



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE BIOLOGÍA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA CIVIL**

TESIS:

***Cuantificación del potencial de aprovechamiento de agua de lluvia
a partir de azoteas de edificios de CU de la UMSNH***

Para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Presenta:

Citlali Daniela Cauich Kantun
Ing. Ambiental

Director de Tesis:

Dr. Ezequiel García Rodríguez

Co-director de tesis:

Dr. Roberto García Acevedo

Morelia, Michoacán, noviembre del 2020



Índice

RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
1. Introducción	1
2. Marco teórico	2
2.1. Reservas de agua en el mundo	2
2.2. El ciclo hidrológico.....	3
2.3. El Cambio Climático y los recursos hídricos	5
2.4. Situación del agua en México	6
2.5. Situación del agua en Michoacán	7
2.6. Sistemas de abastecimiento de agua.....	8
2.7. Uso racional del agua.....	9
2.8. Cosecha de agua de lluvia	10
2.9. Componentes de un SCALL.....	12
2.9.1. Área de captación.....	12
2.9.2. Sistema de conducción.....	13
2.9.3. Interceptor de primeras aguas	17
2.9.4. Infraestructura de almacenamiento	19
2.9.5. Filtración y tratamiento	20
2.10. Potencial de captación	21
2.10.1. Precipitación pluvial.....	21
2.10.2. Criterios del área de captación.....	21
2.10.3. Demanda de agua	22



2.10.4.	Capacidad de almacenamiento	23
3.	Antecedentes	24
4.	Justificación	29
5.	Hipótesis.....	31
6.	Objetivos	31
6.1	Objetivo General	31
6.2	Objetivos específicos	31
7.	Metodología.....	31
7.2.	Análisis de precipitaciones	33
7.3.	Áreas de captación.....	38
7.2.1	Imágenes satelitales Google Earth	39
7.2.2	Fotogrametría con dron	40
7.4.	Condiciones de azoteas	63
7.5.	Estimación del consumo de agua	73
7.6.	Capacidad instalada de almacenamiento en el campus	77
8.	Resultados	82
8.1.	Volumen de captación y almacenamiento.....	82
8.1.1.	Escenario 1	82
8.1.2.	Escenario 2.....	85
8.1.3.	Escenario 3.....	88
8.1.4.	Escenario 4.....	90
8.2.	Propuestas y recomendaciones de gestión y almacenamiento de agua.....	93
9.	Conclusiones	97
10.	Referencias	99



Índice de figuras

Figura 1. Distribución del agua en el mundo.	3
Figura 2 Ciclo Hidrológico simplificado con sus componentes y fases.....	4
Figura 3. Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México, 2017	6
Figura 4. Configuración típica de un sistema de abastecimiento de agua en localidades urbanas.....	9
Figura 5. Opciones de captación y almacenamiento de agua de lluvia.....	11
Figura 6. Captación de Agua Pluvial en Techos planos.....	13
Figura 7. Ejemplo de canaletas con micro malla para sistema de conducción.	14
Figura 8. Interceptor de primeras aguas Tlaloque.....	18
Figura 9 Cisterna de almacenamiento domiciliaria de 11,000 litros.	19
Figura 10. Chultún, antiguos sistemas de almacenamiento maya en Uxmal.	25
Figura 11. Corte del chultun.	26
Figura 12. Metodología del proyecto.....	32
Figura 13. Ubicación de área de estudio.....	33
Figura 14.Estación 2 Red de Monitoreo de Calidad del Aire.....	35
Figura 15. Precipitación anual estación 16080 Morelia (OBS), Mich. (1986-2015)	36
Figura 16. Precipitación mensual en el periodo 1986-2015.	37
Figura 17. Precipitaciones promedio mensuales en los periodos 1986-1999 y 2000-2015.	38
Figura 18. Edificio D y edificio de la facultad de Arquitectura. Lado Izquierdo, planos de CU. Lado derecho, Imágenes satelitales Google Earth 2017.	39
Figura 19. Dron DJI Mavic Air usado en el proyecto.	41
Figura 20. Aplicaciones usadas para la planeación del vuelo.	41
Figura 21. Polígonos generados en el plan de vuelo a través de Pix4D Capture.	42



Figura 22. Equipo GPS RTK.	44
Figura 23. Colector de datos móvil de equipo GPS.....	45
Figura 24. Identificación de puntos de control.....	46
Figura 25. Puntos de control marcados en CU.....	46
Figura 26. Señalamientos de puntos de control.	47
Figura 27. Vuelo en zonas de canchas de futbol.....	47
Figura 28. Interfaz de aplicación Pix4D durante vuelo.	48
Figura 29. Verificación de parámetros durante vuelo.....	48
Figura 30. Interfaz de programa Agisoft Photoscan.	49
Figura 31. Puntos de control en formato txt.....	50
Figura 32. Localización de puntos de control.	50
Figura 33. Puntos de enlace referenciados (polígono 12 de CU).....	52
Figura 34. Nube de puntos densa (polígono 12 de CU).	52
Figura 35. Malla con color extrapolada (polígono 12 de CU).	53
Figura 36. Modelo Digital de Elevaciones (polígono 12 de CU).	53
Figura 37. Curvas de nivel (polígono 12 de CU).	54
Figura 38. Ortomosaico (polígono 12 de CU).....	54
Figura 39. Ortofoto de Ciudad Universitaria UMSNH.	56
Figura 40. Ortofoto Estadio Universitario UMSNH.	57
Figura 41. Nuevos edificios en CU.	61
Figura 42. Edificio no actualizado en Google Earth.....	61
Figura 43. Edificio ampliado en CU.	62
Figura 44. Vista de azotea Edificio B1.....	67
Figura 45. Estado de la azotea edificio C2.....	68
Figura 46. Obstáculos en edificios de C.U.	70
Figura 47. Falta de mantenimiento en edificio T CU.	70
Figura 48. Estado de mantenimiento en edificios de CU.....	71
Figura 49. Gárgolas para desalojo de agua de lluvia en edificios de C.U.	72
Figura 50. Pozo No. 2 OOAPAS en CU.	74
Figura 51. Localización de cisternas existentes en CU.	79



Figura 52. Cisterna edificios Economía.....	80
Figura 53. A) Cisterna en buen estado de mantenimiento. B) Cisterna en mal estado de mantenimiento.	81
Figura 54. Cisterna localizada en áreas verdes de CU.	94
Figura 55. Figura 56. A) Reductor de turbulencia. B) Pichancha flotante.....	95
Figura 56. Esquema de bombeo solar.	96

Índice de tablas

Tabla 1. Dimensionamiento de canaletas.	15
Tabla 2 Coeficientes de escurrimiento por tipos de material.	22
Tabla 3. Características del plan de vuelo.	42
Tabla 4. Precisión del equipo GPS utilizado.....	44
Tabla 5. Puntos de control obtenidos de Ciudad Universitaria.	45
Tabla 6. Propiedades de la cámara Mavic Air.	49
Tabla 7. Configuración de parámetros Mavic Air.....	51
Tabla 8. Puntos de control con Google Earth.....	55
Tabla 9. Comparación de áreas de captación.	57
Tabla 10. Materiales y coeficientes de escorrentía de los edificios de CU.....	62
Tabla 11. Edificios para el muestreo de agua de lluvia en CU.	64
Tabla 12. Resumen de resultados de calidad de agua techos de CU.....	64
Tabla 13. Características de azoteas de edificios analizados por Arreola (2015). 65	
Tabla 14. Consumo de agua semanal en edificio C (actualizado).....	75
Tabla 15. Número de alumnos por disciplina académica en el Campus de CU de la UMSNH.	75
Tabla 16. Periodos de consumo mensual, según calendario 2019-2020 UMSNH.76	
Tabla 17. Capacidad instalada de almacenamiento de agua CU.....	77
Tabla 18. Escenario 1. Simulación de agua de lluvia, uso del 100% del área.	83



Tabla 19. Balance de agua de lluvia Escenario 1.....	83
Tabla 20. Escenario 2. Simulación de agua de lluvia, uso del almacenamiento disponible en el campus.	85
Tabla 21. Balance de agua de lluvia Escenario 2.....	86
Tabla 22. Escenario 3. Aprovechamiento de agua de lluvia.....	88
Tabla 23. Balance de agua de lluvia Escenario 3.....	89
Tabla 24. Escenario 3. Aprovechamiento de agua de lluvia.....	91
Tabla 25. Balance de agua de lluvia Escenario 3.....	91



RESUMEN

En el presente trabajo, se determinó el potencial de aprovechamiento de agua de lluvia a partir de las azoteas de los edificios de Ciudad Universitaria de la UMSNH (Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo). Para ello, se consideraron cuatro factores: precipitación pluvial, el área de captación, la demanda de agua y el almacenamiento. Para obtenerlo, se recabó información de la precipitación pluvial de la base de datos CLICOM. Además, se obtuvieron las áreas de captación a partir de una ortofoto generada con fotografías aéreas tomadas con un dron, procesadas en el software Agisoft PhotoScan Professional y medidas en ArcMap 10.6.1. Estas fotografías sirvieron para evaluar aspectos cualitativos de las condiciones actuales de las azoteas. Por otro lado, se obtuvo el consumo de agua de los usuarios del campus. Como resultado, se generaron cuatro escenarios para el aprovechamiento de agua de lluvia en C.U., donde las principales variantes fueron el área de captación y la capacidad de almacenamiento. Al representar la simulación dinámica del agua de lluvia, se determinaron los meses en los cuales se puede satisfacer la demanda bajo esos parámetros. En ese sentido, se planteó el uso de la infraestructura de almacenamiento existente para una menor inversión en sistemas para todos los edificios. Con el uso del almacenamiento actual, se puede satisfacer la demanda en un 80% utilizando el 100 % del área, y en un 68% utilizando el 50% del área. Sin embargo, se recomienda dar mantenimiento a las cisternas, así como las áreas de captación, para no alterar la calidad del agua de lluvia, ya que su uso final del agua es para consumo humano. Esto con el fin de ser parte de la investigación para la implementación SCALL en la UMSNH, como ejemplo de sustentabilidad en las universidades.

Palabras clave: SCALL, áreas, demanda, almacenamiento



ABSTRACT

In this work, the potential use of rainwater was determined from the roofs of the buildings of the University Campus of the UMSNH. For this purpose, four factors were considered: rainfall, catchment area, water demand and storage. To obtain it, information on rainfall was collected from the CLICOM database. Furthermore, the catchment areas were obtained from an orthophoto generated with aerial photographs taken by a drone, processed by the Agisoft PhotoScan Professional software and measured by ArcMap 10.6.1. These photographs were used to evaluate qualitative aspects of the current conditions of the rooftops. On the other hand, the water consumption of the campus users was obtained. As a result, four scenarios were generated for the use of rainwater in C.U., where the main variants were the catchment area and the storage capacity. By representing the dynamic simulation of rainwater, the months in which the demand can be satisfied under these parameters were determined. In this sense, the use of the existing storage infrastructure was proposed for a lower investment in systems for all buildings. With the use of current storage, demand can be met by 80% using 100% of the catchment area, and 68% by using 50% of the catchmentB area. However, it is recommended to maintain the cisterns, as well as the catchment areas, so as not to alter the quality of the rainwater, since the final use of the water is for human consumption. This in order to be part of the research for the implementation of SCALL in the UMSNH, as an example of sustainability in universities.



1. Introducción

El agua es un recurso fundamental para el equilibrio de los sistemas naturales y la vida en la Tierra. Sin embargo, su uso como fuente infinita por parte del ser humano amenaza nuestra existencia y la de todos los seres vivos en el planeta.

Como una reacción en cadena, el incremento de la población mundial genera necesidad alimentaria, necesidad energética, creación de industrias y otros servicios que no podrían llevarse a cabo sin agua. Al mismo tiempo, después de usarse, el agua es contaminada y vertida en nuestras fuentes naturales como aguas residuales.

El fenómeno de escasez, llamado así por la falta de disponibilidad de agua dulce, se ha convertido en uno de los problemas más críticos de recursos que enfrenta la humanidad (Hernández, 2017). Principalmente, esta problemática ha sido resultado de las malas políticas de administración y uso de reservas de agua (Esparza, 2014).

En la actualidad, los seres humanos nos restringimos a emplear fuentes de agua superficiales y subterráneas para abastecer nuestras necesidades. Por ende, la demanda provoca que los principales recursos de agua superficial sean contaminados y, como resultado, el uso y sobreexplotación de fuentes de agua subterránea o acuíferos.

Más aún, detrás de cada gota de agua dulce que consumimos hay energía involucrada, desde su recolección hasta su consumo, mismo que se resume en el uso de combustibles fósiles y contaminación del aire (Allen, 2015).

Por ello, se han ampliado los esfuerzos para la obtención de agua que, con un enfoque sostenible, no involucre un daño medioambiental considerable, así como un menor consumo de energía y costos. Una de estas alternativas es la cosecha de agua de lluvia, el cual es un medio que nos permite la obtención de agua para uso humano.



Debido a su calidad, no requiere mayor esfuerzo para su tratamiento (a diferencia de las plantas de potabilización) y puede ser empleado directamente de los techos de las casas o establecimientos.

En ese sentido, dado que las grandes concentraciones urbanas de hoy en día consisten en edificios (en los cuales se desarrollan negocios y usos públicos de una forma cómoda y segura), se ha investigado el uso de estos sistemas en las ciudades como una tercera opción de fuente de agua dulce (Haq, 2017).

La presente investigación fue llevada a cabo en Ciudad Universitaria de la UMSNH como caso de estudio, en donde fue cuantificado el potencial de aprovechamiento de agua pluvial a partir de azoteas, considerando factores como la precipitación, el área de captación y el volumen de almacenamiento. Esto, con el fin de conocer las condiciones necesarias para abastecer la demanda de consumo de agua en los edificios ya sea parcial o totalmente durante el año.

2. Marco teórico

2.1. Reservas de agua en el mundo

El agua se presenta en estados líquido, sólido y gaseoso; y es distribuido en glaciares, ríos, lagos, mares, suelos y acuíferos alrededor del mundo. Esto de una manera no uniforme, de acuerdo a variables meteorológicas, físicas y geográficas, que dependen de la precipitación y el agua renovable para cada país.

Actualmente, se ha podido estimar que existen 1,386 billones de hm^3 de agua en el mundo, de los cuales el 97.5% le corresponden al agua salada y el 2.5% al agua dulce. Del agua dulce, un 70% corresponde al agua congelada en glaciares, nieve hielo y permafrost; y el 30% es agua dulce subterránea (CONAGUA, 2018). Sin embargo, menos del 1% le corresponde al agua accesible que se encuentra en las fuentes de aguas superficiales como lagos y ríos (Figura 1).

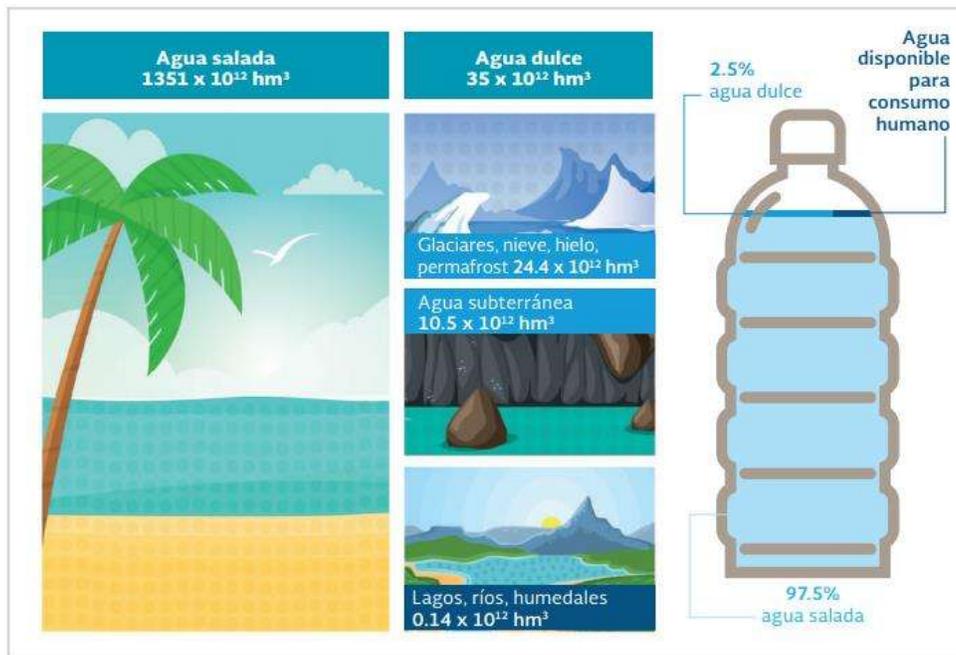


Figura 1. Distribución del agua en el mundo.
Fuente: CONAGUA (2018) con datos de Clarke & King. The Water Atlas (2004).

Si bien el agua disponible es suficiente para satisfacer la demanda creciente en el mundo, el reto es compartirla equitativamente entre países y, al mismo tiempo, asegurar la sostenibilidad de los ecosistemas (WWAP, 2006). De igual forma, se distribuye de manera heterogénea de acuerdo a los intereses políticos, económicos y sociales.

Así, por ejemplo, en el periodo de 1996-2005, China, India y Estados Unidos consumieron cerca del 38% del agua dulce disponible en el mundo según su huella hídrica, con un total de 1,207 Gm³, 1182 Gm³ y 1053 Gm³, respectivamente, seguidos por Brasil con 482 Gm³ (Hoekstra & Mekonnen, 2012).

2.2. El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el recorrido y almacenamiento del agua a través de la biósfera, la atmósfera, la litósfera, hidrósfera y criósfera (Ordoñez, 2011).



Este sistema, impulsado por la energía del sol, consta de varias etapas, iniciando con la evaporación del agua de las superficies libres (como los océanos, ríos, lagos y embalses), la evapotranspiración de las plantas y la pérdida de agua de la superficie del suelo gracias al calor del sol, cambiando de un estado líquido a uno gaseoso y elevando el agua a través de la tropósfera (CAPA, 2014).

Debido al cambio de temperatura y la reducción de la presión atmosférica con la altitud, el agua se enfría hasta el punto en el que la temperatura se encuentra por debajo de la temperatura de punto de rocío, donde la humedad no puede retenerse y cae en forma de precipitación pluvial ya sea en forma líquida o sólida (Haq, 2017).

Al precipitar, el agua consigue llegar de nuevo al océano, o ir a la superficie terrestre, en donde es almacenada en cuerpos de agua. También una parte fluye en las corrientes de los ríos, conocida como escorrentía superficial, y otra parte se infiltra y forma un flujo de agua subterránea (FAO, 2013) (Figura 2).

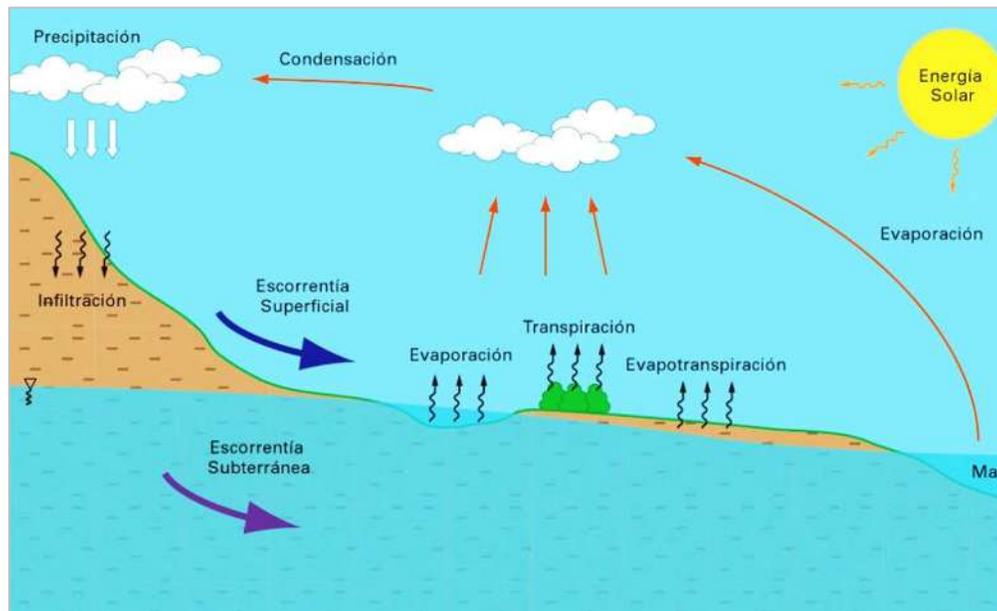


Figura 2 Ciclo Hidrológico simplificado con sus componentes y fases.
Fuente: Martínez-Alfaro et al. (2006).



No obstante, conforme lo mencionado por Abbott et al. (2019), esta visión ideal del ciclo del agua es actualmente interrumpida por la actividad humana, el cambio climático y el cambio de uso de suelo.

Como resultado de la facilidad de acceso a las aguas superficiales, la interferencia humana ha causado contaminación difusa de distintos sectores a los principales cuerpos de agua; el cambio climático genera sequías e inundaciones que intensifican el ciclo hidrológico; y el uso de las tierras altera la evapotranspiración y la convección de las corrientes de aire, entre otros (Abbott et al., 2019).

2.3. El Cambio Climático y los recursos hídricos

Según el Informe de síntesis del Cambio Climático 2014, presentado por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) el calentamiento en el sistema climático que se ha registrado desde la década de 1950 no tiene precedentes en los últimos decenios a milenios.

Esto ha provocado alteraciones en la atmósfera y temperatura de los océanos, lo que genera impactos en los sistemas naturales ya que son sensibles a cualquier alteración en el clima.

Ejemplo de ello son los cambios en las precipitaciones, ya que se prevee que éstos no serán uniformes, disminuyendo en regiones secas de latitud media subtropicales y aumentando en latitudes altas, de acuerdo a los escenarios planteados en periodos de 1986-2005 a 2081-2100.

Del mismo modo, se plantea la probabilidad de que la ocurrencia de episodios de precipitación extrema en masas terrestres de latitud media y regiones tropicales húmedas sea directamente proporcional al incremento de las temperaturas (IPCC, 2014).



Las alteraciones en el ciclo hidrológico mundial se verán reflejados en las zonas con mayor vulnerabilidad climática, como las costas y los glaciares, así como las zonas de cultivo y de zonas con rápidos procesos de urbanización. En ese sentido, el fenómeno generado por la escasez de agua en ciertas regiones provoca la necesidad del desarrollo de estrategias de adaptación al cambio climático.

2.4. Situación del agua en México

De acuerdo al documento Estadísticas del Agua en México (2018) elaborado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el concepto de agua renovable es: *la cantidad máxima de agua que es factible explotar anualmente en un país sin alterar el ecosistema y que se renueva por medio de lluvia.*

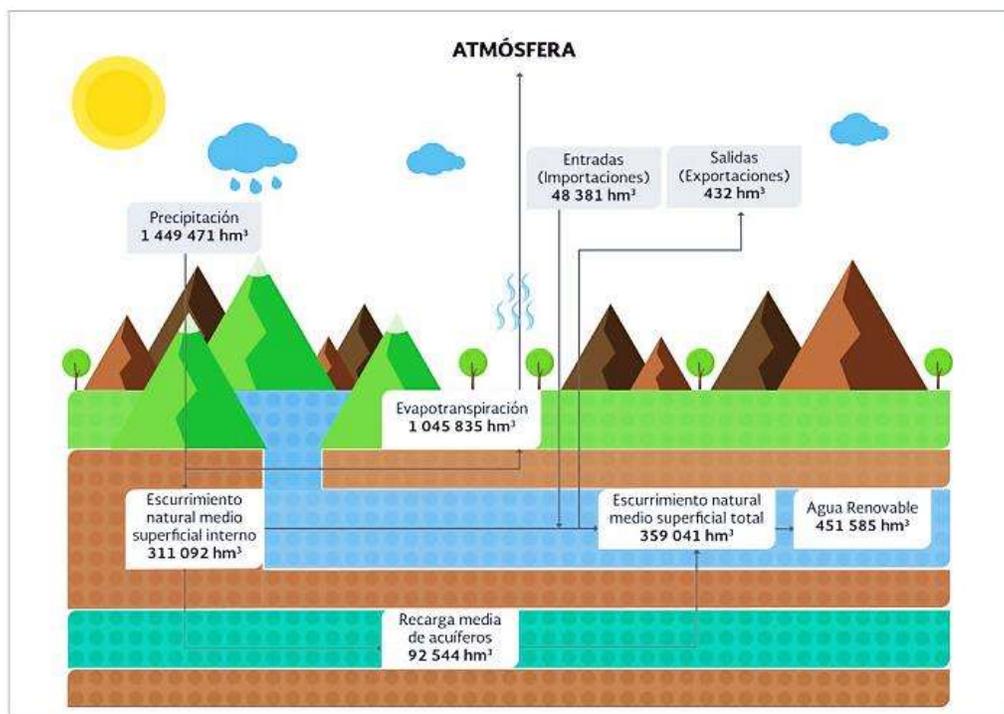


Figura 3. Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México, 2017
Fuente: CONAGUA (2018).



Lo anterior se determina a partir de un balance con los flujos de entrada y salida de agua: al escurrimiento natural medio superficial se le suma la recarga media de acuíferos, más las entradas menos las salidas (Figura 3).

Sin embargo, la disponibilidad de agua por habitante en México ha cambiado de 18,700 m³ en el año 1950 a 4,550 m³ per cápita en el año 2004 (Saltiel, 2008). Actualmente, el agua renovable es de 451,585 hm³ anuales, de los cuales corresponderían a 3,656 m³ per cápita al año 2017 (CONAGUA, 2018).

En cuestión de recursos hídricos, se cuenta con 653 acuíferos para la administración de aguas subterráneas, los cuales aportan el 39% del volumen para el consumo en el país. No obstante, 105 de ellos se encuentran en condición de sobreexplotación, 32 con presencia de suelos salinos y agua salobre, y 18 con intrusión salina.

Asimismo, existen 757 cuencas para la administración de aguas superficiales organizadas en 37 regiones hidrológicas, 8 cuencas transfronterizas y 51 ríos principales (CONAGUA, 2018).

Entre los principales retos que enfrenta el país en materia de agua destacan la escasez, la contaminación, necesidad de mejorar la administración del agua, falta de ordenamiento ecológico, cambio climático y la inversión en investigación y desarrollo tecnológico (Arreguín et al., 2010).

2.5. Situación del agua en Michoacán

Michoacán es un estado rico en biodiversidad y recursos naturales. Como en todo el país, el agua es uno de los recursos más importantes para llevar a cabo las actividades económicas, principalmente de agricultura. Sin embargo, en años recientes, la sobrepoblación, la contaminación del agua, la falta de ordenamiento ecológico, el cambio ilegal de uso de suelo, tala ilegal y el cultivo de aguacate han ocasionado que la disponibilidad de agua disminuya.



En ese sentido, los cultivos de huertos de aguacate son uno de los principales problemas, ya que se extienden ilegalmente y consumen una gran cantidad de agua debido a que son ubicados comúnmente aprovechando zonas boscosas (perdiendo hasta el 30% de bosques) los cuales son un elemento esencial para la recarga de los acuíferos en el Estado.

Por ello, actualmente algunas comunidades ya se encuentran en conflicto por el agua. Un ejemplo son las comunidades de Uspero, Carácuaro y Zitácuaro, en donde el agua ya no llega debido a la construcción de pozos que consumen el agua en zonas de huertos de aguacate (García, 2019).

Del mismo modo, en Parácuaro y Tierra Caliente del Valle de Tepalcatepec enfrentan conflictos armados por la tenencia del agua, que empiezan a expandirse a comunidades como Charo y el Valle de Queréndaro (Molina, 2019).

Este tipo de situaciones han provocado una disminución en el volumen disponible de agua superficial y subterránea para la población. En ese sentido, Morelia, la capital Michoacana, se encuentra en riesgo de que en no más de 10 años, sufra un colapso en el abastecimiento regular de agua (Molina, 2019).

Actualmente, la ciudad de Morelia ya empieza a manifestar problemas de desabasto de agua en al menos 99 colonias, según el Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS) debido a los bajos niveles registrados en el manantial La Mintzita, una fuente de agua limpia que abastece la ciudad (Alfaro, 2020).

2.6. Sistemas de abastecimiento de agua

En general, los sistemas modernos de abastecimiento de agua se componen de obras que aprovechan el agua de cuerpos como ríos, manantiales, presas o depósitos subterráneos para su conducción, bombeo, tratamiento y distribución a través de redes para el consumo de los usuarios (CONAGUA, 2016). La configuración típica de estos sistemas se muestra en la Figura 4.

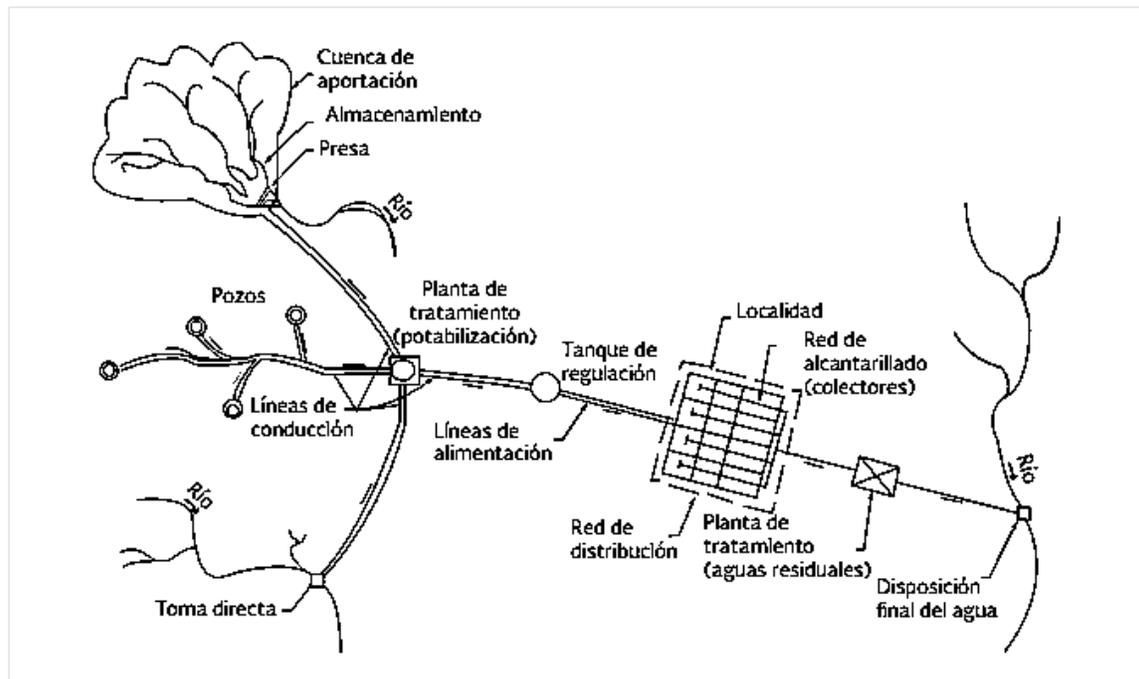


Figura 4. Configuración típica de un sistema de abastecimiento de agua en localidades urbanas.
Fuente: CONAGUA (2015).

Estos sistemas tienen como finalidad abastecer de agua tanto en calidad como en cantidad a millones de habitantes para satisfacer sus necesidades básicas, así como combatir enfermedades causadas por el consumo de agua contaminada y una mala disposición de ella.

2.7. Uso racional del agua

El agua que corresponde al agua dulce disponible para el consumo humano actualmente está propensa a la contaminación por diversas fuentes como las aguas residuales, residuos sólidos y eutrofización. Por otra parte, el aumento demográfico (con más de 7,500 millones de personas) ha provocado una alta demanda de este recurso, que se obtiene sobreexplotando alrededor del 20% de los acuíferos en el mundo (Gleeson et al., 2012).



Si esto sigue así, la necesidad de este recurso podría superar a la capacidad de la Tierra de suministrar agua en un 40% para el año 2030 (2030 WRG, 2012). Como resultado de la latente crisis del agua, son necesarias las acciones para su uso responsable y racional.

Las estrategias principales consisten en el uso de un volumen mínimo, suficiente para satisfacer las necesidades básicas, como el aseo personal y la limpieza. En estos casos, se recomienda el uso de dispositivos ahorradores de agua para regaderas e inodoros (que consume aproximadamente un 40% del agua en el hogar).

De igual forma, una forma importante para el cuidado del agua es el arreglo de goteras o fugas dentro de los hogares, lo que permite ahorrar hasta 100,000 litros de agua al año (Water & Sanation, 2016).

Además, el agua de uso doméstico e industrial se puede utilizar de manera múltiple, es decir, reutilizarla en más de una actividad para un uso eficiente, así como para reducir los costos de operación, siempre y cuando se cuiden los parámetros de calidad, como la dureza y la temperatura del agua.

Actualmente, existen estrategias tecnológicas que, de manera sustentable, logran satisfacer las necesidades sin comprometer los recursos naturales. Entre ellos se encuentra la captación y aprovechamiento de agua de lluvia, un método antiguo pero que ha crecido por el interés del cuidado del agua para remediar la escasez de agua dulce.

2.8. Cosecha de agua de lluvia

La cosecha de agua de lluvia consiste en la captación, almacenamiento y uso del agua de escorrentía para actividades como el riego, crianza de animales y consumo humano (Figura 5).



En esta actividad, se aprovechan algunas áreas impermeables o semipermeables, que pueden ser techos o patios, como áreas de captación (Cobos, 2017).

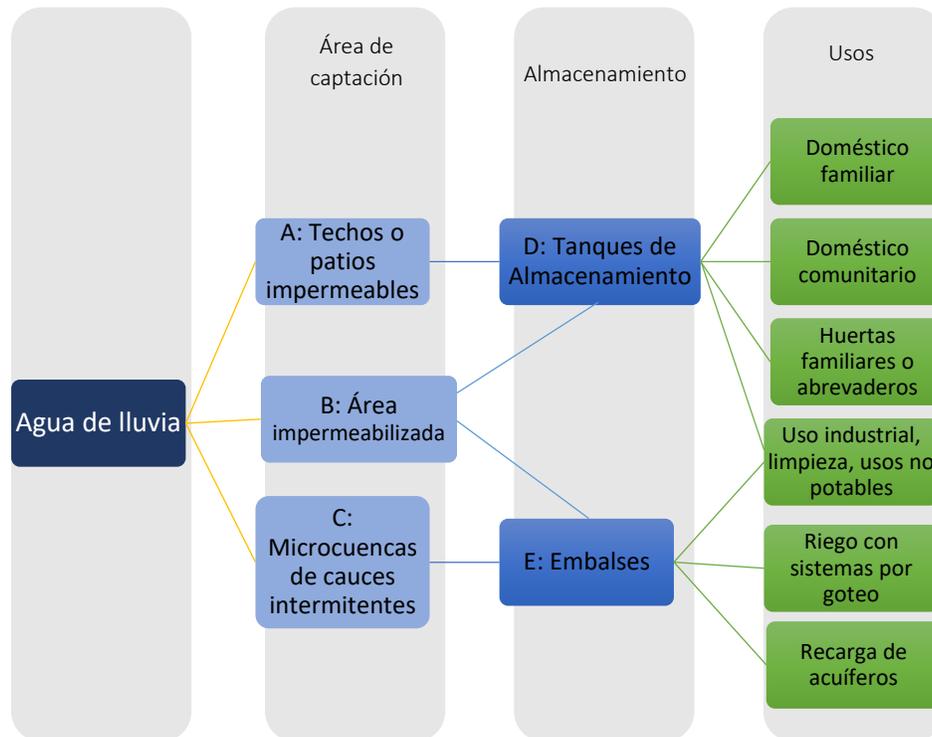


Figura 5. Opciones de captación y almacenamiento de agua de lluvia.
Fuente: Modificado de Cobos (2017).

La cosecha de agua de lluvia es realizada a través de un Sistema de Captación de Agua de Lluvia (SCALL), en el cual se obtiene agua para consumo humano y/o uso agrícola (OPS-COSUDE, 2004).

En general la cosecha de agua de lluvia o RWH (*Rainwater Harvesting*, por sus siglas en inglés) tiene cinco componentes principales: área de captación, sistema de transporte o conducción, filtración, tanque de almacenamiento y bombeo (Vargas, 2009).



Esta actividad se presenta como una alternativa de tecnología sustentable que busca solucionar los problemas de escasez de agua potable, principalmente en poblaciones que carecen en calidad y cantidad de este líquido.

2.9. Componentes de un SCALL

Dentro de los componentes de un SCALL se encuentran:

2.9.1. Área de captación

Es la superficie sobre la cual cae la lluvia, mismo que determina la cantidad de agua a recolectar y el tamaño del tanque de almacenamiento que se va a utilizar. Para diferentes casos, se considera la superficie de techos de viviendas al igual que superficies de suelo o microcuencas protegidas por geomembranas (IMTA, 2015).

En el caso de los edificios, el área de captación se ubica en las techumbres, mismos que deben tener ciertas especificaciones en cuanto al material del que están hechos. Por ejemplo, estos deben evitar la filtración de toxinas como plomo o fungicidas, por lo cual pueden contar con recubrimientos certificados para sistemas de captación de agua de lluvia que aseguren no alterar su calidad (Allen, 2015).

Una característica importante de estas superficies es que no deben desprender olores, colores y sustancias que puedan contaminar el agua pluvial o alterar la eficiencia del sistema (Hernández, 2017). Asimismo, se recomienda el uso de materiales de captación como: concreto, lámina metálica acanalada y teja cerámica (CONAGUA, 2016).

Las cubiertas de los techos pueden clasificarse como techos planos, techos inclinados y techos plegados. Los techos planos (Figura 6) son considerados así hasta un ángulo $<10^\circ$, estos son más económicos ya que requiere menos materiales de construcción y un tiempo más corto (Haq, 2017).



Por otra parte, los techos inclinados tienen una superficie con un ángulo $>10^\circ$, mismos que pueden ser de forma piramidal, tipo mirador (hexagonal), etc. En el caso de los techos plegados, son construidos combinando capas unidas en varios ángulos, como los techos de diente de sierra, los techos en forma de M y los techos de mariposa (Haq, 2017).

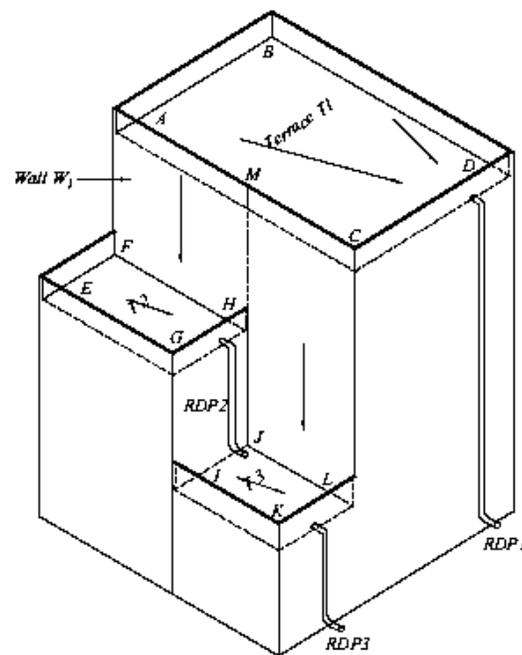


Figura 6. Captación de Agua Pluvial en Techos planos.
Fuente: (Haq, 2017)

Para su cálculo, se utiliza la proyección horizontal del techo, que debe contar también con una pendiente que facilite el escurrimiento del agua (OPS-COSUDE, 2004).

2.9.2. Sistema de conducción

Una vez establecida el área donde llega el agua, es dirigida a través de un sistema de conducción, instalado en los bordes bajos del techo, formado por canaletas y bajantes, hacia el sistema de almacenamiento (Hernández, 2017).



Una de las características que deben cumplir las tuberías o canaletas, es tener las dimensiones adecuadas al volumen de escorrentía y una pendiente uniforme hacia el tubo de conducción (FAO, 2013). Las canaletas son instaladas horizontalmente y pueden estar niveladas o ligeramente inclinadas, lo cual se recomienda para aumentar el flujo de agua. Por otro lado, las bajantes se unen a las canaletas que luego transmiten la escorrentía desde la parte superior de una estructura hasta el nivel del suelo o hacia un sistema de drenaje pluvial (Mechell et al., 2009).

El material de este sistema debe ser liviano, resistente al agua y fácil de unir, preferentemente, de acero galvanizado o aluminio, con fondo redondeado para disminuir la acumulación de escombros (Mechell et al., 2009). La CONAGUA (2016) recomienda el uso de PVC (policloruro de vinilo), ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), polipropileno y polietileno para la conducción de agua de lluvia. Al estar expuestos a la presencia de hojas de árboles, es necesario contar con rejillas o mallas que retengan sólidos grandes (Figura 7).



*Figura 7. Ejemplo de canaletas con micro malla para sistema de conducción.
Fuente: <https://www.easyongutterguard.com/>*



Para dimensionar las canaletas, es necesario: 1) conocer el valor de la intensidad de la lluvia durante 60 minutos en un periodo de retorno de 100 años del área de interés; 2) calcular el área de captación; 3) determinar el tamaño de canaleta a partir de la pendiente, la intensidad de la lluvia y el área máxima (Mechell et al., 2009). Esta estimación es obtenida a partir de la IAPMO (Asociación Internacional de Códigos de Plomería y Mecánica) en su publicación *Uniform Plumbing Code* (2000) (Tabla 1).

Tabla 1. Dimensionamiento de canaletas.

Área de captación máxima admisible para diferente densidad de lluvia						
Pendiente	Diámetro de canaleta (in)	Intensidad 50 mm/hr	Intensidad 75 mm/hr	Intensidad 100 mm/hr	Intensidad 125 mm/hr	Intensidad 150 mm/hr
1%	3	45	30	22	18	15
	4	95	63	47	38	32
	6	253	169	126	101	84
	8	520	347	260	208	174
	10	948	632	474	379	316
2%	3	63	42	32	25	21
	4	134	89	67	54	45
	6	357	238	178	143	119
	8	740	493	370	295	247
	10	1338	892	669	534	446
4%	3	89	59	45	36	30
	4	190	126	95	76	63
	6	515	343	257	206	172
	8	1041	693	520	416	347
	10	1858	1238	929	743	619

Fuente: Arreola (2018) modificado de IAPMO (2000).

En el caso de nuestro país, la CONAGUA (2016) recomienda garantizar una pendiente mínima del techo de 2%, así como una pendiente mínima de la canaleta de un 2% para su flujo hacia el tubo colector.

En función del área de captación y la intensidad de la lluvia, se calcula el gasto que escurre del área de captación hacia la canaleta con la siguiente fórmula (Anaya et al., 2018):



$$Q_1 = \frac{5}{18} (I * A)$$

Ecuación (1)

Donde:

Q_1 = Gasto estimado para pasar por la canaleta, en l/s.

I = Intensidad de la lluvia, en m/h.

A = Área de proyección horizontal de las instalaciones de captación, en m^2 .

$5/18$ = Factor de conversión de m^3/h a l/s.

Por otra parte, para calcular el gasto de las bajantes o tuberías, se emplea la siguiente ecuación de continuidad:

$$Q_2 = A_H * v$$

Ecuación (2)

Donde:

Q_2 = Gasto esperado en un periodo de retorno determinado en l/s.

A_H = Área hidráulica de la sección de conducción en m^2 .

v = Velocidad del caudal en m/s.

Esta velocidad del caudal se calcula mediante la Ecuación de *Manning*:

$$v = \frac{1}{n} r^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación (3)



Donde:

v= Velocidad del caudal en m/s.

n= Coeficiente de rugosidad (del material de revestimiento del tubo).

r= Radio hidráulico, en m.

S= pendiente.

En las bajadas de agua de lluvia, es recomendable tener una por cada 100 m², en caso de ser mayor, se instala una cada 5-9 metros de distancia (Anaya et al., 2018). El cálculo del diámetro se realiza con la siguiente fórmula:

$$D = \sqrt{\frac{Q_1}{\pi * v}}$$

Ecuación (4)

Donde:

D= Diámetro de las tuberías de bajada, en m.

Q₁= Gasto estimado para pasar por la canaleta, en l/s.

v= Velocidad del caudal en m/s.

2.9.3. Interceptor de primeras aguas

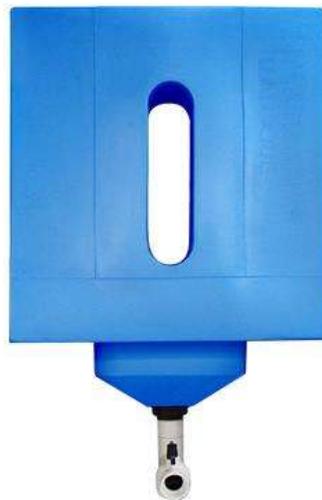
El agua de lluvia, al pasar por la tubería de bajada y un filtro de sólidos gruesos, llega a un interceptor de primeras aguas, que consiste en un sistema que separa el agua de la primera lavada del techo durante la lluvia y evita que ingrese al tanque de almacenamiento.



Este sistema es útil para asegurar la calidad del agua debido a que, durante los periodos secos, los contaminantes como escombros, suciedad y polvo se acumulan en el techo (Abdullah et al., 2017).

De acuerdo a los lineamientos de la CONAGUA (2016), la cantidad en volumen de las primeras lluvias debe ser calculado en función del área de captación, con una relación de 0.40 litros de agua separada por cada metro cuadrado.

Un ejemplo de este sistema es el separador de primeras lluvias modelo Tlaloque de Isla Urbana (Figura 8), el cual consiste en un contenedor que recibe la primera descarga de agua de lluvia, su funcionamiento se basa en un flotador interno que cierra la entrada del contenedor al alcanzar el volumen deseado, permitiendo el paso del agua hacia el tanque de almacenamiento (Isla Urbana, 2018).



*Figura 8. Interceptor de primeras aguas Tlaloque.
Fuente: IMTA (2015).*



2.9.4. Infraestructura de almacenamiento

El tamaño de las estructuras de almacenamiento depende del área de captación, la precipitación de la zona y la demanda de agua de los usuarios (FAO, 2013). Los depósitos o tanques de almacenamiento (Figura 9) pueden ser de materiales prefabricados, que garanticen no transmitir olor o sabor al agua almacenada, como el ferrocemento, concreto, metal o polietileno. También debe garantizar ser impermeable, hermético y accesible (CONAGUA, 2016).



*Figura 9 Cisterna de almacenamiento domiciliar de 11,000 litros.
Fuente: IMTA (2015).*

En los tanques de almacenamiento es necesario asegurar la calidad del agua para su posterior consumo. Los problemas que pueden presentarse pueden ser de carácter físico, químico o microbiológico.

Los problemas físicos se encuentran relacionados con la acumulación de sedimentos y contaminantes al interior de los tanques, para solucionarlo, se adapta una salida más elevada que el fondo del tanque, que sirve como sedimentador, y su constante mantenimiento y limpieza (Mantoya-Pachongo, 2012).



Los problemas químicos se encuentran asociados como resultado de reacciones químicas, lo cual genera olor, sabor, incremento de pH, corrosión, acumulación de hierro y manganeso, presencia de sulfuro de hidrógeno y lixiviación de revestimientos internos (Kirmeyer et al., 1999).

De acuerdo a lo citado por Mantoya (2012) de Kirmeyer (1999), otro de los problemas es la pérdida del desinfectante residual, es decir, cuando el desinfectante (generalmente cloro) se reduce por efecto del volumen de agua en comparación con la cantidad del mismo, dejando el agua susceptible a la contaminación microbiológica, aumento de temperatura, nitrificación y exposición a luz ultravioleta, entre otros.

Una solución a este problema es el mantenimiento y monitoreo de las concentraciones del desinfectante, instalación de sistema de bombeo y sistema de mezclado. En cuanto a los problemas de tipo microbiológico, los crecimientos bacterianos pueden ocurrir por variaciones en la temperatura del agua y disponibilidad de nutrientes que promueven su crecimiento, formando una biopelícula.

Además, puede presentarse un proceso microbiológico llamado nitrificación, donde el amoníaco se convierte a nitritos y éstos a nitratos, mismo que altera las características del agua. Como medida preventiva, se recomienda reducir el tiempo de retención en el tanque, promover el mezclado y aplicar la cloración (Kirmeyer et al., 1999).

2.9.5. Filtración y tratamiento

Antes de destinarlo al consumo humano, es necesario que el agua cumpla con ciertos criterios de calidad de las normas correspondientes. De acuerdo a las necesidades de uso del agua, se puede utilizar un filtro poroso, donde son separados los sólidos suspendidos, o bien, a nivel comunitario se utilizan sedimentadores para reducir la turbidez del agua (Hernández F. , 2017).



Si el uso final es la ingesta de agua, uno de los tratamientos utilizados es por medio de filtros de arena, seguida por la desinfección con cloro (OPS-COSUDE, 2004). Más adelante, se comentarán otros métodos de tratamiento del agua.

2.10. Potencial de captación

Existen cuatro factores importantes para el diseño de un SCALL: precipitación pluvial, área de captación, demanda de agua y la capacidad de almacenamiento, de los cuales se obtiene la cantidad de agua almacenable disponible para aprovechar en diferentes actividades (Anaya et al., 1998).

2.10.1. Precipitación pluvial

La precipitación pluvial corresponde a la cantidad de agua disponible en una determinada región, esto se mide con un pluviómetro en campo o a través de las estaciones meteorológicas que conservan los datos históricos anuales o mensuales.

Para evaluarla, existen otros factores asociados con la precipitación en ciertas regiones, ya que es necesario conocer la intensidad, duración y frecuencia de las lluvias para la determinación de los escurrimientos máximos superficiales (Anaya et al., 1998). En cuanto a los históricos de precipitación de un lugar, la CONAGUA (2016) recomienda un análisis de registros de al menos 15 años. Otros autores mencionan el uso ideal de registros de más de 10 años (Cobos, 2017; FAO, 2013).

2.10.2. Criterios del área de captación

Además de las características mencionadas en el apartado 2.9.1, es importante destacar que la eficiencia de la captación de agua de lluvia depende también del coeficiente de escurrimiento de los materiales del área de captación (Tabla 2).



Tabla 2 Coeficientes de escurrimiento por tipos de material.

Material o tipo de construcción	K_e
Cubiertas metálicas o plásticas (PVC, Polietileno)	0.95
Techos impermeabilizados o cubiertos con materiales duros.	0.9
Concreto hidráulico	0.9
Lámina metálica corrugada	0.8

Fuente: CONAGUA (2016).

Este coeficiente se refiere a la fracción de la lluvia que escurre de forma efectiva en la superficie. Los factores involucrados que determinan el coeficiente de escurrimiento son: intercepción, detención superficial, almacenamiento de la humedad en el suelo, escurrimiento superficial, infiltración, flujo subsuperficial, evapotranspiración y percolación (CONAGUA, 2016). Esto quiere decir que los valores expuestos en tablas oficiales contienen implícitamente esta información.

Para mejorar su eficiencia, se pueden utilizar materiales para impermeabilizar los techos que además mejoran la calidad del agua como los pisos impermeabilizados o empedrado (Anaya et al., 1998).

2.10.3. Demanda de agua

La demanda de agua expresa la cantidad de agua que necesita un lugar, en función de los habitantes a beneficiar, para cumplir con las funciones físicas y biológicas de su cuerpo en un determinado periodo de tiempo (Anaya, 2007).

Para el cálculo, la CONAGUA (2016) en “Lineamientos Técnicos: Sistema De Captación de Agua de Lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda”, la demanda de agua mensual utiliza la siguiente fórmula:



$$DA = \frac{Ca * Ov * Dm}{1000}$$

Ecuación (5)

Donde:

DA: Demanda de agua mensual en m³/mes.

Ca: Consumo de agua, en l/usuarios/día.

Ov: Ocupación, en usuarios/edificio.

Dm: Días del mes, en días.

1000: Factor de conversión de litros a m³.

2.10.4. Capacidad de almacenamiento

No todo el volumen captado es deseable de almacenar, esto va más bien en función de la demanda de agua, usos y de otros factores como los costos de materiales y disponibilidad de espacio (costo-beneficio). Para conocer el promedio de captación de agua anual, se usa la siguiente fórmula (CONAGUA, 2016):

$$V_A = \frac{\bar{p} * A * k_e}{1000}$$

Ecuación (6)

Donde:

V_A: Volumen promedio de captación anual con distribución mensual, en m³.

\bar{p} : Precipitación promedio anual con distribución mensual, en mm.

A: Área de proyección horizontal de las instalaciones de captación, en m².



k_e : Coeficiente de escurrimiento de acuerdo del material de las instalaciones, según la NMX-AA-164-SCFI-2013. Edificación Sustentable - Criterios y Requerimientos Ambientales Mínimos.

A partir de lo anterior, el volumen de almacenamiento en tanques se calcula usando la siguiente fórmula (CONAGUA, 2016):

$$Alm_n = Alm_{n-1} + V_A - D_A$$

Ecuación (7)

Donde:

Alm_n : Volumen de almacenamiento mensual en el tanque, en m^3 .

Alm_{n-1} : Volumen de almacenamiento en el tanque del mes anterior, en m^3 .

V_A : Volumen de captación mensual, en m^3 .

D_A : Demanda de agua mensual de las instalaciones, en m^3 .

Cabe resaltar que, de acuerdo a los parámetros utilizados y limitaciones costo-beneficio, se tiene que asegurar un volumen mínimo diario para hacer más eficiente este sistema durante el periodo de un año, asegurando al menos reserva de agua para los meses más críticos como fuente complementaria (Cobos, 2017).

3. Antecedentes

La cosecha de agua de lluvia, que consiste en captar, almacenar y utilizar agua de lluvia para diferentes actividades humanas, es una de las tecnologías más antiguas del mundo. La historia de las civilizaciones ubicadas en Asia, Europa, África y América menciona su uso, principalmente teniendo en cuenta que era un recurso de agua dulce más accesible y posible de utilizar (MARN, 2016).



Entre los lugares que han aprovechado este recurso se encuentran Israel y Jordania, con sistemas de hasta 4000 años de antigüedad; también se han encontrado estructuras de 1,000 a.C. en Yemen, estanques similares en Roma de los siglos III y IV a.C. así como jarras de captación de agua de lluvia de más de 2,000 años en China (Suárez et al., 2006).

En México, el ejemplo más conocido son las cisternas labradas en roca construidas por la civilización maya para contener agua de lluvia, llamados “chultuns” (Figura 10) para recoger agua de lluvia y utilizarlo en sus cultivos.



*Figura 10. Chultún, antiguos sistemas de almacenamiento maya en Uxmal.
Fuente: Elaboración propia.*

La carencia de fuentes de agua dulce en el suroeste de la Península de Yucatán, fue resuelta mediante estas obras hidráulicas en forma de vasija de barro (Figura 11) impermeabilizadas artificialmente para captar agua de lluvia (Zapata, 1989). Con esto, podían almacenar más de 30 mil litros de agua y servía aproximadamente para 50 personas en un periodo de seis meses (MARN, 2016).

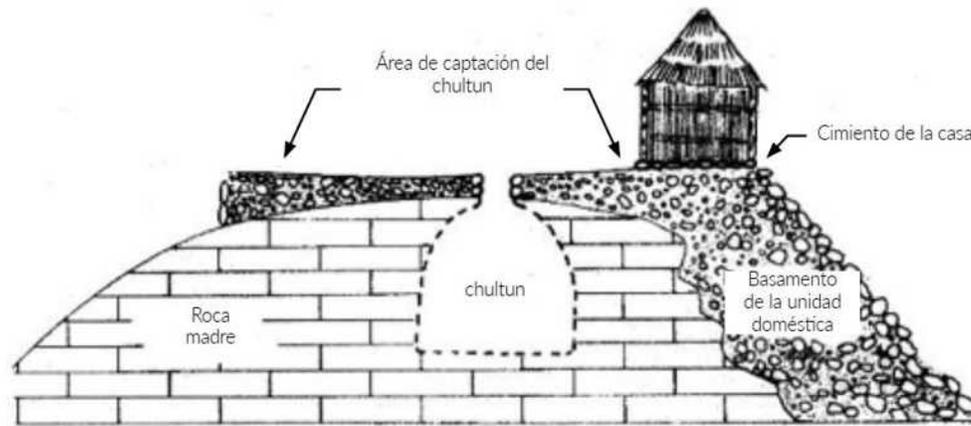


Figura 11. Corte del chultun.
Fuente: Cobos (2017).

Los estudios de potencial de aprovechamiento de agua de lluvia en el mundo se han hecho tomando cuenta datos históricos de precipitación y el abastecimiento insuficiente de agua. Con relación al tema, se analizaron trabajos de importancia que sirvieron de guía para el proyecto, algunos de ellos (con sus títulos originales) son:

- ***Assesing the Potential for Rooftop Rainwater Harvesting from Large Public Institutions***

Este trabajo de investigación se llevó a cabo en Addis Abeba, Etiopía, donde se evaluó el potencial de cosecha de agua de lluvia a través de 320 instituciones públicas. Mediante el uso de ArcGis, se digitalizaron 588 techos y, con ello, se realizaron los cálculos de área de captación. Asimismo, se utilizaron registros de precipitaciones de 10 años para calcular el volumen potencial de captación, dando como resultado un 2.3% de suministro de agua potable anual (Adugna et al., 2018).



- ***Rainwater harvesting potential in Mahasarakham University (Khamriang Campus)***

Para conocer el potencial de la cosecha de agua de lluvia, se utilizó un Análisis de Flujo de Material (MAE), tomando como variables el agua de lluvia que cae desde el techo, la producción de suministro de agua y la estimación del consumo de agua en el campus. En este caso, los límites del sistema fueron los techos de los edificios (Chaimoon, 2009).

- **Potential for rainwater use in high-rise buildings in Australian cities**

Se investigó la viabilidad del uso de agua de lluvia en residenciales de gran altura para cuatro ciudades australianas, donde se establecieron patrones climáticos y diversos niveles de gestión de demanda de agua para la determinación de dimensiones de almacenamiento (Zhang et al., 2009).

- **Rainwater harvesting and green area retention potential detection using commercial unmanned aerial vehicles**

En este trabajo de investigación, se utilizó una fotogrametría simple para evaluar el potencial de captación de aguas pluviales y retención de áreas verdes en una ciudad de Eslovenia.

Los parámetros empleados fueron el área de techo, la pendiente y las áreas verdes disponibles. A través de un vuelo aéreo con drones, se creó un ortomosaico para el reconocimiento de los parámetros de interés a través de un software, con resultados exitosos y un método de bajo costo (Kamnik et al., 2017).



- **Estimación del volumen potencial de agua pluvial con fines agropecuarios**

La estimación se hizo a partir del estudio de los registros de precipitaciones de 28 años de la Universidad de Ciego de Ávila (Cuba), mismo que se analiza dependiendo de su consistencia y frecuencia.

Además, se obtuvo el volumen de captación de agua pluvial, el área de captación y el volumen de almacenamiento. Así, se determinó que el volumen de captación de agua de lluvia oscila entre los 4000 y 13000 litros en seis meses (Brown et al., 2009). En la UMSNH se han realizado trabajos de tesis relacionados con la captación de agua de lluvia, entre ellos se encuentra:

- **Muestreo y análisis de agua de lluvia para su aprovechamiento en las instalaciones de C.U. de la UMSNH**

Se realizó un muestreo *in situ* de agua de lluvia que escurre de las azoteas de varios edificios de C.U. para hacer un análisis de laboratorio del agua para evaluar su calidad. Esto como antecedente para poder implementar la cosecha de agua de lluvia en este campus (Arreola, 2015).

- **Escenarios factibles para el aprovechamiento de agua de lluvia en la Facultad de Ingeniería Civil (Edificio “C”) de la UMSNH.**

Este trabajo consistió en analizar diferentes escenarios que resultan factibles para la captación y aprovechamiento de agua de lluvia a partir del techo del edificio de la Facultad de Ingeniería Civil. Para ello, se variaron el área de captación y la capacidad de almacenamiento, obteniendo también un análisis económico del sistema y la configuración de la conducción del agua (Arreola, 2018).



4. Justificación

Ante la actual crisis del agua en el mundo, la captación de agua de lluvia resulta una alternativa para obtener agua para el consumo humano. Principalmente, tomando en cuenta la energía y recursos empleados para obtener agua potable, desde su recolección en las fuentes de agua, hasta su consumo (Allen, 2015).

En México, no se cuenta con un sistema que separe el agua de lluvia, por lo que se va al drenaje hasta un 60% de agua que puede ser aprovechada (Hernández, 2019). En un entorno urbano, la estrategia de la aplicación de SCALL incluye la mitigación de inundaciones locales, desertificación, erosión y explotación de fuentes superficiales y subterráneas (Gleason et al., 2005).

A diferencia del agua que llega a las plantas de potabilización, la naturaleza del agua obtenida en los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) goza de una mejor calidad físico química, debido a que no interacciona con otros agentes en el suelo, así como con el contacto con fuentes de contaminación antropogénica (exceptuando el aire contaminado) (Mechell et al., 2009).

Asimismo, durante ese proceso ocurren pérdidas de agua, visibles y no visibles, principalmente en tomas domiciliarias y tuberías, como lo mencionan Bourguett y Ochoa (2003), representando pérdidas físicas del 30%.

Por lo anterior, es necesaria una mejor gestión del agua que disminuya la extracción de agua de sus fuentes, con un modelo de planeación urbana que reduzca al mínimo las pérdidas y, al mismo tiempo, tenga una máxima cobertura capaz de abastecer a la población (Monroy, 2013). Esto abre paso a la investigación y desarrollo de alternativas de obtención de agua, como son los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL).



Si bien el aprovechamiento de la lluvia se ha realizado desde épocas prehispánicas, se busca una mejora continua para aprovechar de manera eficiente este recurso con una calidad adecuada para su uso como agua potable.

Cada ciudad tiene su propio potencial de uso de agua de lluvia considerando su precipitación. En Morelia, la precipitación anual en promedio es de 786 mm (CLICOM, 2015), esto nos da una idea del potencial de aprovechamiento.

En ese sentido, es importante la implementación de SCALL en la ciudad, dado que, actualmente, más del 70% de los pozos profundos en la zona urbana se encuentran abatidos. Asimismo, las principales fuentes de agua en la ciudad como el manantial de La Mintzita (que abastece un 33% de agua de la Ciudad de Morelia) y la presa de Cointizio (que abastece un 30% de agua) se encuentran contaminados y sobreexplotados, en riesgo de desaparecer (Molina, 2019).

Para ponerlo a prueba, se eligió Campus de la UMSNH como una institución pública que puede dar el ejemplo en cuestiones de sustentabilidad y gestión sustentable del agua en el Estado. Es importante destacar que esta investigación se complementa a trabajos realizados con anterioridad que permitirá tener una planeación más amplia para la implementación de un Sistema de Captación de Agua de Lluvia.



5. Hipótesis

El potencial de captación de agua de lluvia de los edificios del campus de C.U. de la UMSNH es suficiente para satisfacer las necesidades de consumo de agua para los edificios del campus.

6. Objetivos

6.1 Objetivo General

Evaluar cuantitativa y cualitativamente el potencial de aprovechamiento de agua de lluvia de las azoteas de las edificaciones del campus de C.U. de la UMSNH para el uso en los edificios.

6.2 Objetivos específicos

- Analizar los históricos de precipitación en la zona de estudio.
- Obtener el área de captación total a través de fotogrametría con drones.
- Evaluar cualitativamente las azoteas para la implementación de un SCALL.
- Estimar el consumo de agua de los usuarios en los edificios de C.U.
- Calcular el volumen de captación y almacenamiento de agua pluvial de las azoteas de C.U.
- Proponer volúmenes de almacenamiento de agua de lluvia considerando la demanda y las conveniencias logísticas y económicas.

7. Metodología

En concordancia con los objetivos del proyecto, la metodología para obtener el potencial de captación de agua de lluvia en ciudad universitaria se llevó a cabo en las siguientes etapas (Figura 12):

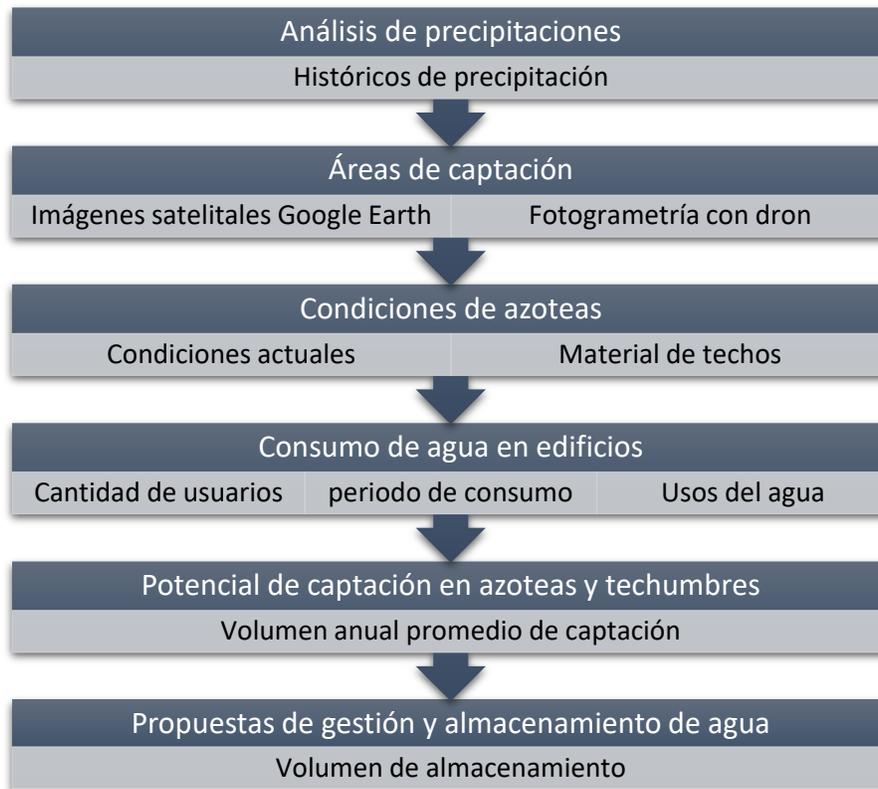


Figura 12. Metodología del proyecto.
Fuente: Elaboración propia.

7.1. Área de Estudio

La Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo se encuentra al suroeste de la ciudad de Morelia, Michoacán, México, con dirección en Avenida Francisco J. Múgica S/N Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México C.P. 58030. Su posición geográfica es de 19°41'26.6" N y 101°12'0.8" W y cubre un área aproximada de 662, 981 m² (Figura 13).

La ciudad de Morelia se caracteriza por un clima con un rango de temperatura entre 12 y 22°C; una precipitación entre los 600 y 1500 mm; y mayormente un clima templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media (INEGI, 2009).

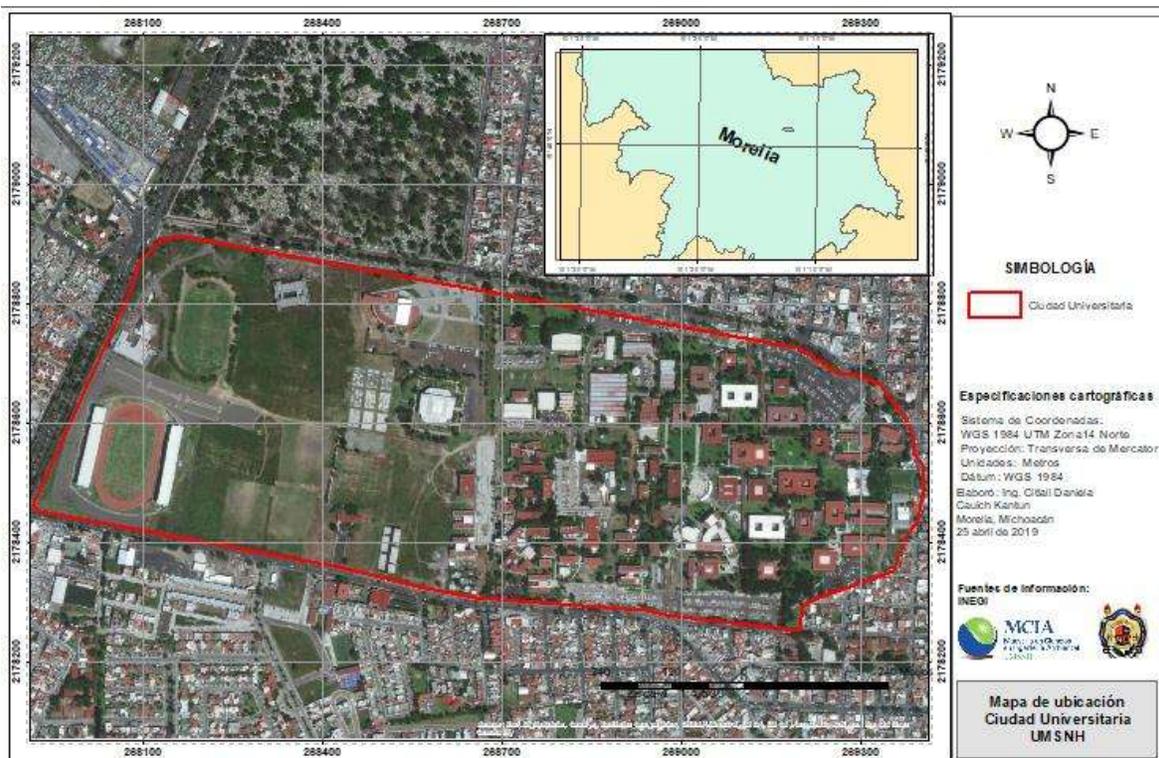


Figura 13. Ubicación de área de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de mapa base satelital de Arcmap.

7.2. Análisis de precipitaciones

El agua que cae en forma de lluvia se mide en unidades de mm (o l/m²), dado que una lámina de un milímetro de lluvia equivale a un litro por cada metro cuadrado. Para cuantificarlo, existen instrumentos de medición llamados pluviómetros y pluviógrafos. Los primeros registran una medida de la cantidad de agua de lluvia en un periodo de 24 horas.

No obstante, a veces esto no es suficiente si se necesita conocer la evolución de la lluvia a través del tiempo, ya que no es lo mismo registrar 80 mm en un día que registrarlo en una hora. Es por ello que se desarrollaron los pluviógrafos, que miden continuamente la cantidad de lluvia (Sánchez, 2012).



De acuerdo a los Lineamientos técnicos de sistemas de Captación de agua de Lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda de la CONAGUA (2016), se recomienda un periodo de precipitaciones de al menos 15 años. Para obtener estos datos, es preciso contar con fuentes de información locales que proporcionen datos pluviométricos y pluviográficos de la zona de estudio.

En México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se encargan de proporcionar esta información en su red de estaciones meteorológicas que, entre otros parámetros, proporcionan los registros de precipitaciones.

A pesar de que se han instalado 5,420 estaciones, 3,200 se encuentran operando y 2,220 se encuentran suspendidas. Sin embargo, la información que se puede obtener resulta útil para caracterizar la precipitación (CONAGUA, 2016).

Con estas estaciones, los datos pluviométricos se pueden obtener de plataformas de normales climatológicas o a través de un software desarrollado por el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) llamado Extractor Rápido De Información Climatológica (ERIC), que utiliza los datos la Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM).

Por su parte, los datos pluviográficos en tiempo real se pueden encontrar a través de las Estaciones Climatológicas Automáticas (EMA'S) y las Estaciones Sinópticas Meteorológicas (ESIME) (CONAGUA, 2016).

Para obtener datos de los registros históricos de precipitación del área de estudio, se contemplaron las estaciones activas más cercanas para su análisis, como la estación de monitoreo de calidad del aire ubicada en el campus.

El Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) contiene información de los Sistemas de Monitoreo de Calidad del Aire (SMCA). En estos sistemas, se encuentran, entre otros, datos crudos de la calidad del aire y variables meteorológicas en tiempo real.



El Estado de Michoacán tiene tres redes de monitoreo, ubicados en: Laboratorio de Salud (LAB), Palacio Municipal y en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Esta Red de monitoreo se encuentra entre el edificio J y el acceso vehicular de la entrada al Norte de Ciudad Universitaria (Figura 14).

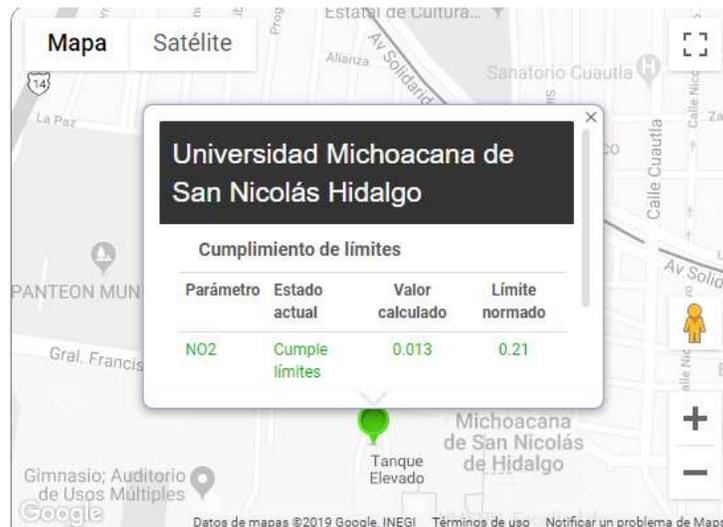


Figura 14. Estación 2 Red de Monitoreo de Calidad del Aire.
Fuente: <https://sinaica.inecc.gob.mx/>

En esta estación, se descargaron los datos crudos de precipitación que existen desde julio del 2013. Aunque el registro pluviográfico es constante, los datos obtenidos fueron escasos y fuera del rango del registro de precipitaciones de la ciudad (precipitación total anual para 2014 de 55.68 mm y 2015 de 44.21 mm), por lo que no se utilizó esta información para este trabajo.

La siguiente opción fue utilizar los datos de la base de datos CLICOM, con la estación meteorológica más cercana. Debido a que el área de influencia de cada estación es de 5 km, se identificó la estación 16080 MORELIA (OBS), MICH, que se encuentra a 2.2 km de la zona de estudio. Esta estación contiene registros de precipitación de mayo de 1986 a octubre del 2015.



La base de datos fue procesada para obtener los promedios de precipitación mensual en ese periodo (29 años). Sin embargo, también se añadió un análisis de las precipitaciones que corresponden al periodo 2000-2015. Aunque no se cuenta con los datos más actuales (2015-2019), se compararon los datos de los años más recientes en un periodo de 15 años según la base de datos (Figura 15 y Figura 16).

De acuerdo a los datos totales, se tiene un promedio de precipitación anual de 786.8 mm. En el caso de precipitaciones extremas mensuales, el mes de julio alcanza los 333.9 mm mientras que el valor máximo registrado para junio es de 233 mm.

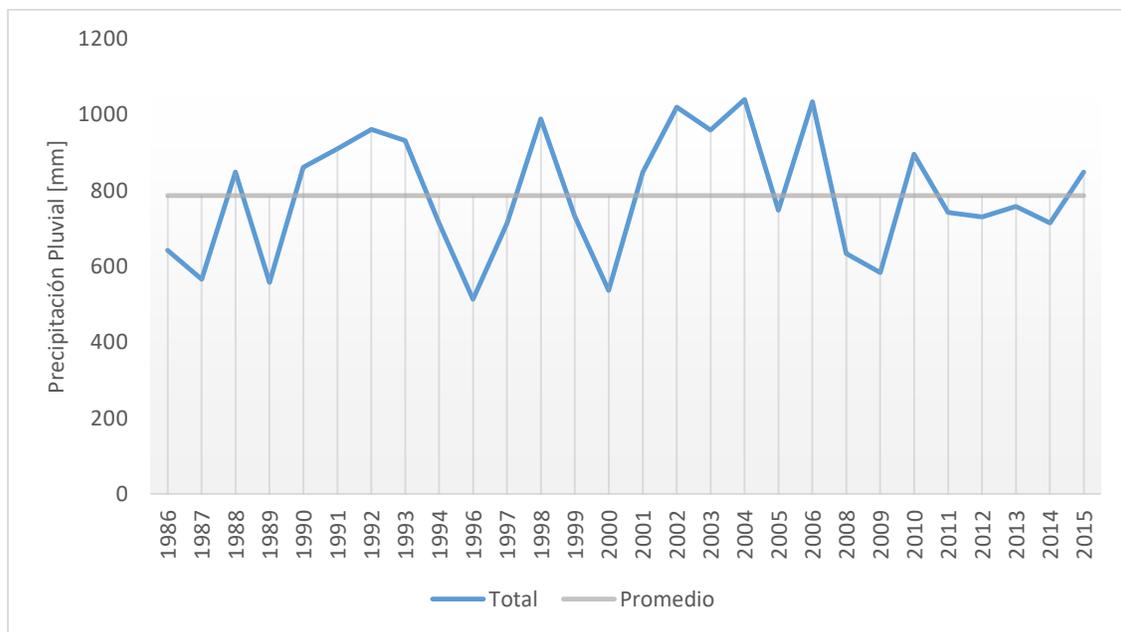
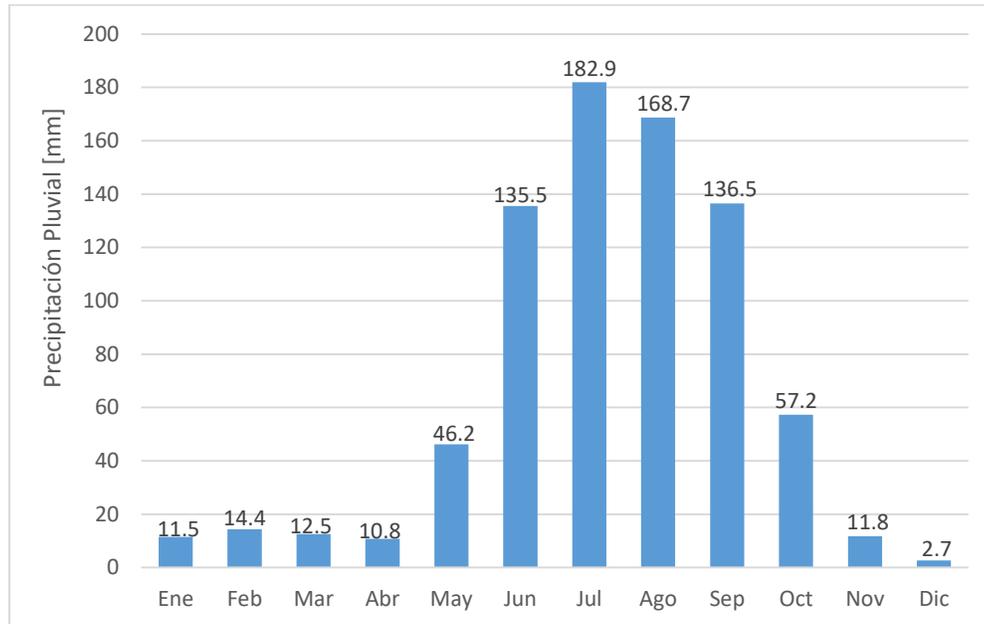


Figura 15. Precipitación anual estación 16080 Morelia (OBS), Mich. (1986-2015)
Fuente: Elaboración propia con Base de datos CLICOM.



*Figura 16. Precipitación mensual en el periodo 1986-2015.
Fuente: Elaboración propia con base de datos CLICOM.*

Se sabe que actualmente vivimos en un tiempo de variación climática que ha cambiado la temperatura media de la tierra hasta 1.1°C como resultado de las concentraciones de CO_2 en la atmósfera desde la década de 1980, este comportamiento anormal se ha acelerado en los últimos 10 años (IPCC, 2014). Esto implica también un cambio en el ciclo natural del agua y las precipitaciones en la Tierra.

En la Figura 17, se muestran las variaciones de precipitaciones mensuales para los dos periodos 1986-1999 y 2000-2015.

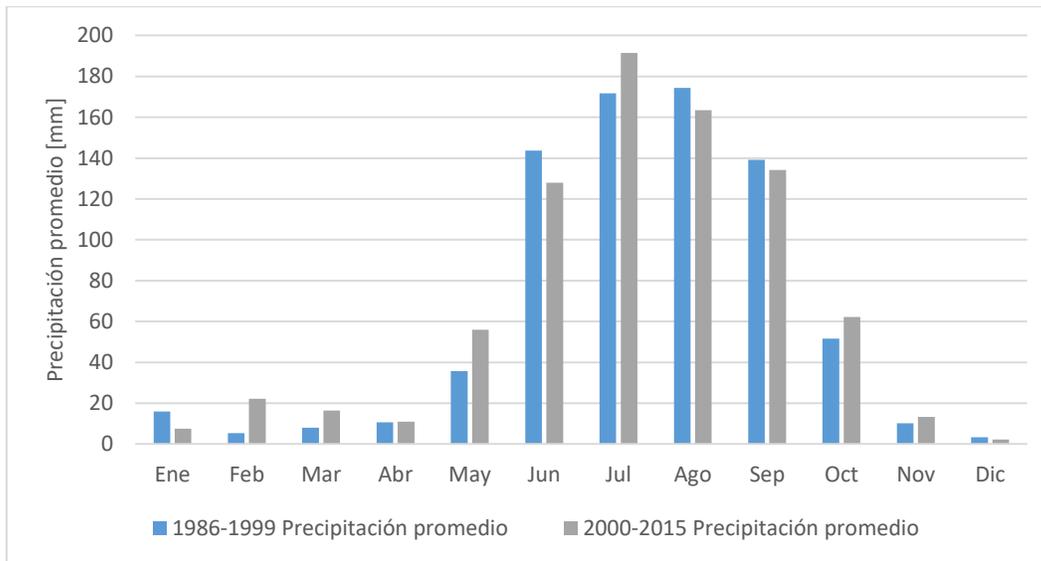


Figura 17. Precipitaciones promedio mensuales en los periodos 1986-1999 y 2000-2015.
Fuente: Elaboración propia con base de datos CLICOM.

La precipitación promedio anual para el periodo 1985-1999 fue de 769.7 mm y la precipitación promedio del periodo 2000-2015 fue de 807.69 mm, presentando un aumento en un 4.7%. En general, los meses con mayor precipitación se conservan junio, julio, agosto, septiembre y octubre. Estos representan un 81.69% del total en el periodo de 1986-1999 y un 76.38% del total de precipitación pluvial del periodo 2000-2015. Lo que indica un cambio en la distribución temporal de la precipitación.

7.3. Áreas de captación

En Ciudad Universitaria, la superficie donde puede aprovecharse el agua de lluvia es el área de las azoteas y techumbres de los pasillos principales, ya que éstos tienen recubrimientos impermeables que aseguran la calidad del agua. En contraste, el uso de los estacionamientos como área de captación podría alterar la calidad del agua debido a que, cuando aumenta el volumen de escorrentía en las lluvias, suelen arrastrarse los aceites, grasas, metales pesados y otros productos químicos que escapan de los vehículos (Mechell et al., 2009).



Por esta razón, no se consideran las áreas de los estacionamientos en los alcances del proyecto, ya que serían producto de otra investigación, tomando en cuenta el tratamiento de los contaminantes.

En términos de un análisis cuantitativo de áreas de captación para esta investigación, se tomarán en cuenta parámetros de: 1) Área de captación y 2) Coeficiente de escorrentía. Estos parámetros proporcionarán información cuantitativa para conocer el potencial de aprovechamiento de agua de lluvia.

7.2.1 Imágenes satelitales Google Earth

Para hacer una primera aproximación a la cuantificación del área de captación, se obtuvo el Plano de Ciudad Universitaria por parte del Departamento de Planeación de la UMSNH. Sin embargo, algunos edificios no contaban con el patio interior, otros no estaban contemplados, y se consideró que las superficies no se ajustaban a las formas de los edificios, lo cual podía generar mayor error en la medición, como en el ejemplo mostrado en la Figura 18.

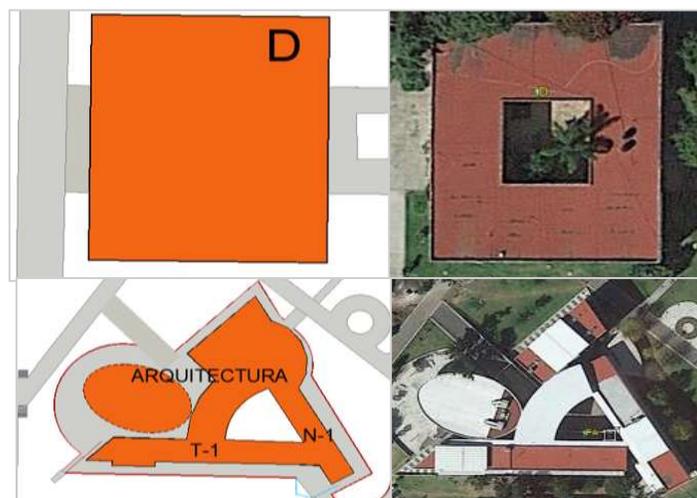


Figura 18. Edificio D y edificio de la facultad de Arquitectura. Lado izquierdo, planos de CU. Lado derecho, Imágenes satelitales Google Earth 2017.

Fuente: Elaboración propia.



De modo que se utilizó Google Earth para la medición de las áreas de los techos, donde se contabilizaron 82 edificios que conformaban Ciudad Universitaria al año 2017. Estos incluyen las facultades, laboratorios, institutos y áreas administrativas, nombrados con ayuda de la información de la relación de espacios del Departamento de Planeación. Asimismo, se contabilizaron las techumbres de los pasillos que se encuentran en la entrada principal.

Con esta aproximación, se calculó un área de captación de 74, 583.09m² para azoteas y 3,628.18 m² de techumbres de pasillos (medidos a una altura de ojo de 70 m) con imágenes aéreas del año 2017.

De acuerdo al área obtenida por Arreola (2018) del edificio C, con medición directa de cinta métrica, se aproxima un error de $\pm 6\text{m}^2$ (0.32%), con respecto a la medición hecha en base a Google Earth del mismo edificio. No obstante, esto se basó en un solo edificio y la medición fue dificultada por la calidad de la imagen satelital.

7.2.2 Fotogrametría con dron

Aunque la información de imágenes satelitales nos proporciona una estimación general del área de captación, se decidió generar la ortofoto de nuestra área de interés, con la finalidad de obtener mediciones de mayor precisión e imágenes actualizadas de los edificios.

La metodología usada en esta etapa es el uso de un dron o Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV) controlado de manera remota. Las ventajas que proporciona el uso de estos equipos son principalmente la generación de información de alta resolución y la obtención de información exclusiva del área de interés.

En este caso, se utilizó un dron portátil marca DJI *Mavic Air*. Se trata de un multirrotor con un peso de 430 g, un tiempo máximo de vuelo de 21 minutos (a una velocidad constante de 25 km/h) y cámara de 12 MP (Figura 19).



Las especificaciones son descritas en el sitio: <https://www.dji.com/mx/mavic-air>. Este equipo es utilizado en trabajos relacionados con fotografía, fotogrametría y topografía.



*Figura 19. Dron DJI Mavic Air usado en el proyecto.
Fuente: Elaboración propia.*

Para llevar a cabo el plan de vuelo, se utilizaron las aplicaciones DJI GO 4, Ctrl + DJI y Pix4D Capture desde un teléfono celular Android (Figura 20).



Figura 20. Aplicaciones usadas para la planeación del vuelo.



Debido a pruebas previas de vuelo, se determinó que el tiempo de vuelo real de este modelo de DJI es de aproximadamente 15 minutos ya que el rendimiento de la batería depende de las condiciones del viento y la temperatura de la aeronave.

Inicialmente, se utilizó la aplicación Pix4D Capture para generar polígonos de vuelo (Figura 21). Tomando en cuenta el tiempo de vuelo de la aeronave, se generaron 14 polígonos o misiones de vuelo que contemplan toda el área construida de Ciudad Universitaria, con un promedio de 10 minutos de vuelo.

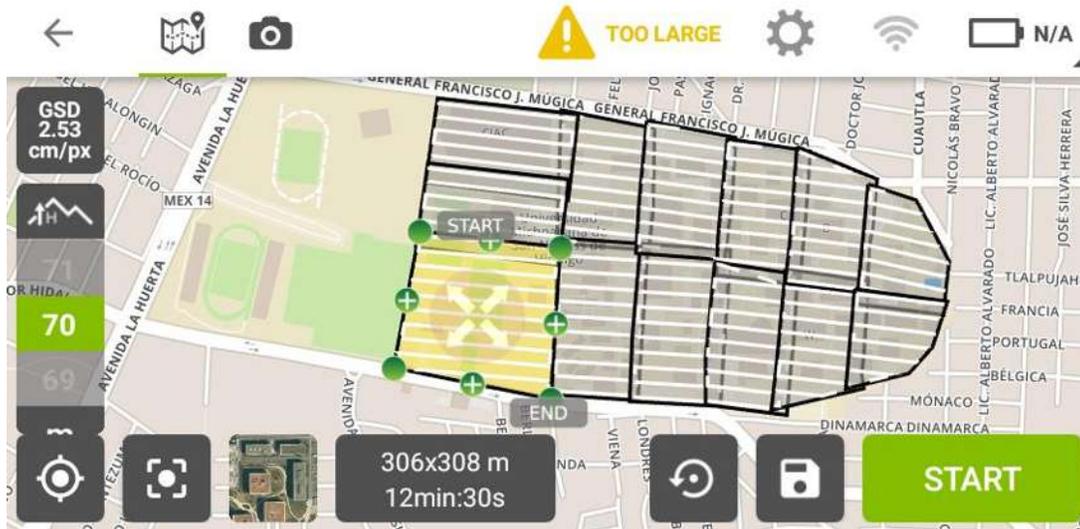


Figura 21. Polígonos generados en el plan de vuelo a través de Pix4D Capture.
Fuente: Elaboración propia con mapa base de Pix4D Capture.

Las características del vuelo se describen en la Tabla 3:

Tabla 3. Características del plan de vuelo.

Polígono	GSD cm/px	H m	Área m	Tiempo min	Traslape %
1	2.53	70	176X240	8.5	80
2	2.53	70	169X269	9	80
3	2.53	70	173X268	9	80
4	2.53	70	183X256	9	80



Tabla 2. Características del plan de vuelo (Continúa).

Polígono	GSD cm/px	H m	Área m	Tiempo min	Traslape %
5	2.53	70	180X258	10	80
6	2.53	70	281X187	11	80
7	2.53	70	281X187	11	80
8	2.53	70	306X308	12.5	80
9	2.53	70	177X299	10	80
10	2.53	70	185X299	10	80
11	2.53	70	169X281	9.5	80
12	2.53	70	179X260	8.5	80
13	2.53	70	187X183	7.5	80

Fuente: Elaboración propia en Pix4D capture.

Cabe destacar que se buscó un traslape entre las misiones para no dejar puntos sin fotografiar y evitar errores en el procesamiento.

Antes de llevar a cabo el vuelo, es necesario la toma de puntos de control o GCP (*Ground Control Points* por sus siglas en inglés), los cuales son parte importante de la fotogrametría, ya que ayudan a reconstruir bien el modelo digital al corregir los errores de posición del dron (Balagué, 2019).

Estos consisten en marcas que se colocan de forma física en el terreno o área de estudio para fotografiarlos en el aire, por lo cual, deben ser perceptibles con una referencia visual, así como establecer sus coordenadas geográficas con precisión (Aerial Insights, 2019).

De acuerdo a la distribución del terreno y el plan de vuelo, se establecieron diez puntos de control distribuidos en CU. Para obtener las coordenadas con precisión, se tomaron puntos con ayuda de un GPS RTK (*Real time Kinematic GNSS*) marca *Sokkia GRS2700 IS Doble frecuencia RTK (GPS)* con las siguientes especificaciones (Tabla 4):



Tabla 4. Precisión del equipo GPS utilizado.

	Precisión del posicionamiento
Estático	3.0 mm + 0.5 ppm (horizontal) 10 mm + 1 ppm (vertical)
Estático rápido	5.0 mm + 1 ppm (horizontal) 10.0 mm + 1 ppm (vertical)
Cinemático, Stop and Go	10 mm + 1 ppm (horizontal) 20.0 mm + 1 ppm (vertical)
RTK	10 mm + 1 ppm (horizontal) 20.0 mm + 1 ppm (vertical)

Fuente: Elaboración propia.

Bajo la proyección UTM-WGS84-Zona14N, se conectó a un receptor base ubicada en el centro de Morelia con coordenadas conocidas hacia un receptor móvil (Figura 22) ubicado en un punto cercano a CU para fijar (calcular) una posición base (coordenadas locales): N: 2178325.409, E: 268525.504, Z: 1904.066. Seguidamente, se conectó a un receptor móvil para realizar el levantamiento en los puntos previamente establecidos.



Figura 22. Equipo GPS RTK.
Fuente: Elaboración propia.



Para señalar cada punto de control, se utilizó el colector de datos móvil (Figura 23), el cual marcaba de manera precisa los puntos sobre el lugar deseado, colocado fijamente hasta no tener variación en las coordenadas.



Figura 23. Colector de datos móvil de equipo GPS.
Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvieron las coordenadas UTM de los puntos de control (Tabla 5):

Tabla 5. Puntos de control obtenidos de Ciudad Universitaria.

x	y	z	ID	Ubicación
268562.7512	2178555.014	1904.904	1	Cancha fútbol americano
268549.4027	2178390.519	1902.8449	2	Canchas de frontón
268590.768	2178739.604	1906.419	3	CIAC
269012.6171	2178721.994	1905.7541	4	Laboratorio FIE
269025.0565	2178529.045	1904.9492	5	Biblioteca central
269025.0565	2178327.55	1902.1611	6	Bellas artes
269326.100	2178362.83	1902.0162	7	Basurero Contabilidad I
269254.7986	2178521.955	1903.6739	8	Gastronómico
269305.9555	2178607.68	1902.2772	9	Estacionamiento economía
269308.944	2178342.459	1902.0162	10	Basurero Contabilidad II

Fuente: Elaboración propia.

Para tener una referencia visual de los mismos, los puntos de control fueron identificados con estacas y pintados con aerosol (Figura 24Figura 25):



*Figura 24. Identificación de puntos de control
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 25. Puntos de control marcados en CU.
Fuente: Elaboración propia.*

De igual modo, durante los vuelos, sobre los puntos de control se colocaron cartulinas de 60x60 cm cuyo centro se colocó sobre las estacas para una mejor visualización en las imágenes (Figura 26).



*Figura 26. Señalamientos de puntos de control.
Fuente: Elaboración propia.*

Después de encender la aeronave, se utilizó la aplicación DJI GO 4 para verificar parámetros como el nivel de batería, número de satélites, calibración, activar sensores anticolidión y punto de regreso al origen, entre otros.

Seguidamente, se utilizó la aplicación CTRL+DJI para hacer conexión con la aeronave e iniciar la aplicación Pix4D. En esta aplicación, se eligió la misión y se inició el vuelo (Figura 28). Durante el mismo, se monitoreó el recorrido de la aeronave, verificando que siga la misión y se mantenga la señal del control remoto (Figura 29).



*Figura 27. Vuelo en zonas de canchas de fútbol.
Fuente: Elaboración propia.*

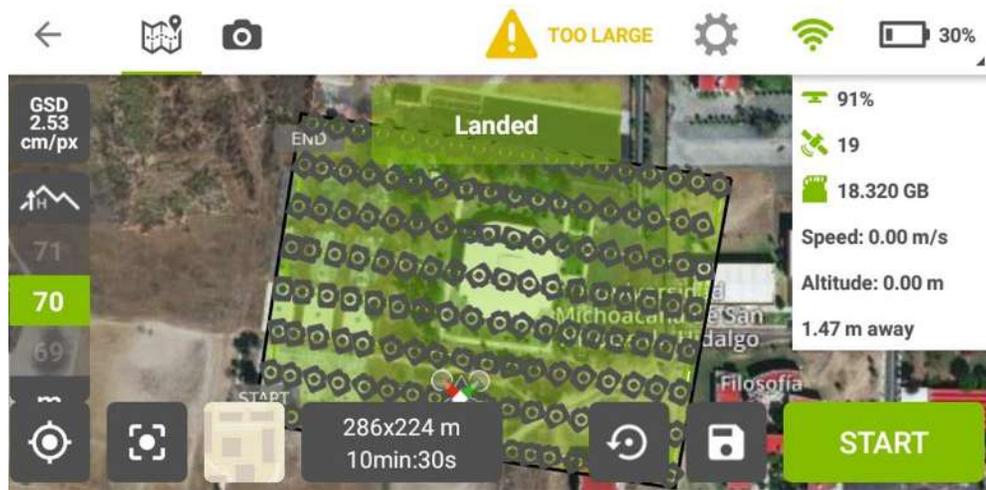


Figura 28. Interfaz de aplicación Pix4D durante vuelo.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 29. Verificación de parámetros durante vuelo.
Fuente: Elaboración propia.

Después de llevar a cabo los vuelos, las imágenes tomadas fueron procesadas a través del software *Agisoft Photoscan Profesional* (Figura 30), que permite realizar el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales obtenidas con drones. El procedimiento del flujo de trabajo es el siguiente:



1. Carga de fotografías: cada imagen cuenta con una georreferenciación geográfica, por lo cual, las cámaras se alinean de acuerdo a la misión realizada.

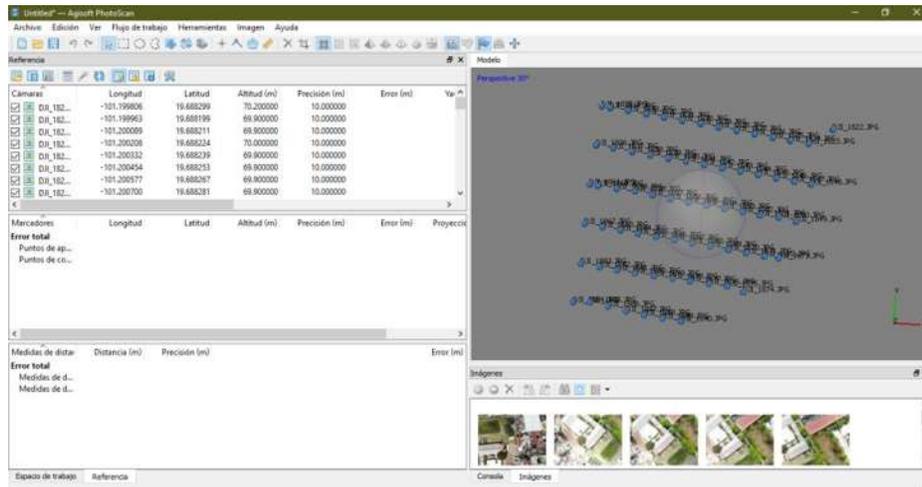


Figura 30. Interfaz de programa Agisoft Photoscan.
Fuente: Elaboración propia.

2. Calibración de la cámara: se verifican los datos de la cámara. Para el Mavic Air, los parámetros obtenidos se señalan en la Tabla 6 :

Tabla 6. Propiedades de la cámara Mavic Air.

Tipo de cámara	Normal
Tamaño de pixel en el sensor	0.00160048 x 0.00160048
Distancia focal	4.5 mm

Fuente: Elaboración propia.

3. Orientar fotos: para una orientación extra y emparejamiento de las fotografías.
4. Proyectar: dado que inicialmente las coordenadas de las fotografías son geográficas, se convierten al sistema de coordenadas correspondiente a WGS 84/UTM Zone 14 (EPSG::32614).



5. Puntos de referencia: se añaden los puntos de control tomados en campo (Figura 31), para ello, se importa el archivo de puntos en formato .txt (o .csv), previamente guardado.

ID	X	Y	Z
C1	268562.7512	2178555.014	1904.904
C2	268549.4027	2178390.519	1902.8449
C4	269012.6171	2178721.994	1906.419
C5	269012.6171	2178721.994	1905.7541
C6	269025.0565	2178327.55	1902.1611
C7	269326.1000	2178362.83	1902.0162
C8	269254.7986	2178521.955	1903.6739
C9	269305.9555	2178607.68	1902.2772
C10	269308.944	2178342.459	1902.0162

Figura 31. Puntos de control en formato txt.
Fuente: Elaboración propia.

6. Al cargar los puntos de control (se necesitan al menos tres por lote), se abre cada fotografía para encontrar el punto, en este caso la cartulina que pusimos de referencia. Se añade el punto de control correspondiente en cada una de las fotografías donde aparece (Figura 32).



Figura 32. Localización de puntos de control.
Fuente: Elaboración propia



7. Se optimiza el cálculo de orientaciones donde el programa permite deformar el modelo para ajustarse a los puntos de control y eliminar las deformaciones que pudiera tener (Figura 33).
8. Nube de puntos densa: se genera la nube de puntos densa, donde se crea un número elevado de puntos con coordenadas en el terreno, de acuerdo a la calidad que se ajuste (Figura 34).
9. Malla: con la nube de puntos densa se genera una red irregular de triángulos, con el fin de obtener la imagen digital (Figura 35)
10. Modelo digital de elevaciones: se genera el modelo a partir del mallado (Figura 36), así como las curvas de nivel (Figura 37).
11. Ortomosaico: con el modelo digital de elevaciones, se genera el ortomosaico del área de estudio (Figura 38).

Las configuraciones generales se describen en la Tabla 7:

Tabla 7. Configuración de parámetros Mavic Air.

Paso	Parámetro	Configuración
Orientar fotos	Precisión	Media
	Procesar emparejamiento	Genérico
	Puntos clave por foto	40,000
Optimizar orientación	f, cx, cy, k1, k2, k3, p1, p2	Ajustar
Crear nube de puntos densa	Calidad	Media
	Filtrado de profundidad	Agresivo
Crear malla	Tipo de superficie	Bajorrelieve/ terreno.
	Datos fuente	Nube de puntos densa
	Número de caras	Alta
	Interpolación	Extrapolada

Elaboración propia



Figura 33. Puntos de enlace referenciados (polígono 12 de CU).
Fuente: Elaboración propia



Figura 34. Nube de puntos densa (polígono 12 de CU).
Fuente: Elaboración propia



Figura 35. Malla con color extrapolada (polígono 12 de CU).
Fuente: Elaboración propia

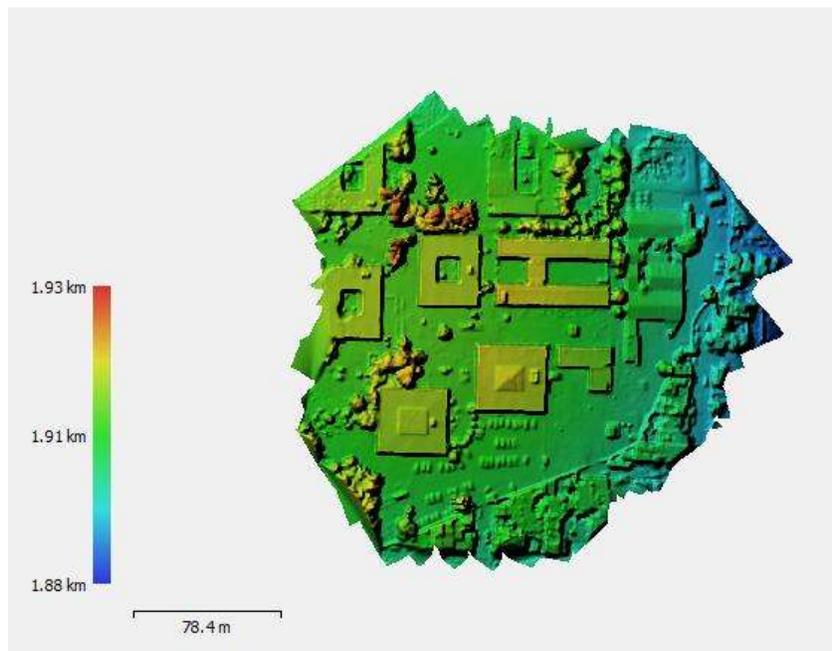


Figura 36. Modelo Digital de Elevaciones (polígono 12 de CU).
Fuente: Elaboración propia

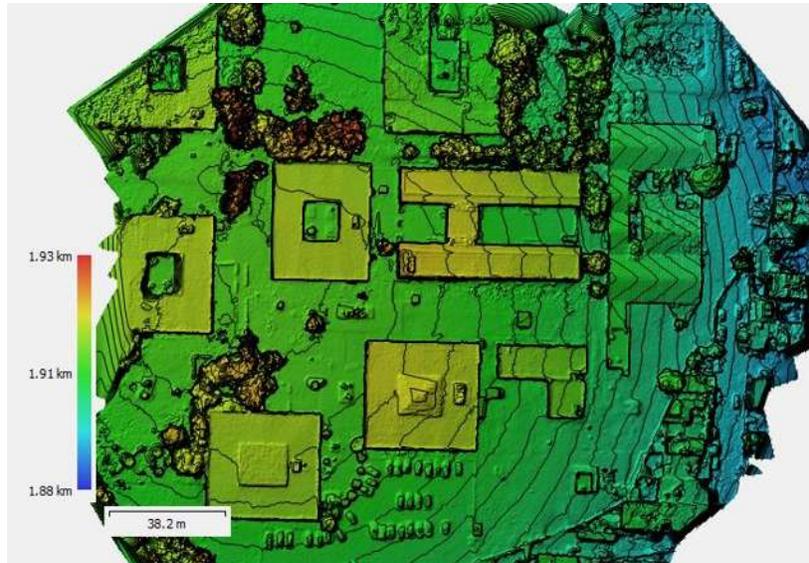


Figura 37. Curvas de nivel (polígono 12 de CU).
Fuente: Elaboración propia



Figura 38. Ortomosaico (polígono 12 de CU).
Fuente: Elaboración propia



Para la generación de la ortofoto de Ciudad Universitaria y medición de áreas, se realizó un procesamiento por lotes en *Agisoft*, en el cual se pre-procesó cada una de las misiones para después realizar un emparejamiento mediante los marcadores o puntos de control.

Debido a que los puntos de control que se tomaron en campo no fueron suficientes para la cantidad de vuelos que se hicieron con el dron para ortorrectificar correctamente, se tomaron 31 puntos de control utilizando la herramienta de *Google Earth* (Tabla 8):

Tabla 8. Puntos de control con Google Earth

Punto	X	Y	Z
P1CH2	269180.57	2178644.94	1908
P1CH4	268930.99	2178644.07	1911
P1CH8	268634	2178560	1907
P1CH10	268896.18	2178321.32	1903
P1CH12	269234.64	2178441.03	1905
P2CH2	269182.05	2178548.35	1908
P2CH4	268854.93	2178692.25	1910
P2CH10	268845.61	2178354.22	1904
P2CH13	269161.1	2178295.65	1903
P3CH2	269132.66	2178738.07	1906
P3CH4	268868.75	2178775.27	1909
P3CH10	268883.69	2178436.6	1905
P4CH11	269007.11	2178452.69	1905
P5CH13	269154.37	2178524.35	1907
P6CH13	269265.9	2178399.38	1904
P1CH7	269389.23	2178488.45	1904
P2CH5	268661.04	2178719.75	1909
P2CH9	268790	2178330	1905
P3CH5	268562.42	2178832.34	1910
P3CH9	268756	2178554	1906
P4CH2	269132.97	2178737.48	1909
P4CH4	268814.24	2178615.92	1909
P4CH9	268831.51	2178403.64	1906
P4CH13	269091.89	2178427.59	1904
P5CH11	269080.22	2178530.32	1907



Tabla 7. Puntos de control con Google Earth (continúa)

Punto	X	Y	Z
P6CH11	269093.96	2178450.24	1904
ESTAD1	268111.44	2178616.73	1912
ESTAD2	268001.06	2178602.11	1909
ESTAD3	268100.23	2178466.13	1905
ESTAD4	268227.44	2178615.33	1908
ESTAD5	268024.66	2178460.19	1905

Fuente: Elaboración propia

Con este procesamiento, se obtuvo la ortofoto de ciudad universitaria que, a diferencia de la imagen satelital de *Google Earth*, tiene una mejor resolución (2.24 cm/pix), por lo que se ve con mayor detalle, y se encuentra actualizada al año 2020 (Figura 39 y Figura 40).



Figura 39. Ortofoto de Ciudad Universitaria UMSNH.
Fuente: Elaboración propia



Figura 40. Ortofotografía Estadio Universitario UMSNH.
Fuente: Elaboración propia

Con las ortofotografías obtenidas (archivos .tif), se midieron las áreas de las azoteas, utilizando el programa *ArcMap 10.6.1*. para cada edificio y se compararon estos resultados con las áreas obtenidas en *Google Earth* (Tabla 9):

Tabla 9. Comparación de áreas de captación.

No.	Edificio	Nombre	Área Google Earth	Área Dron	% diferencia
			(m ²)	(m ²)	
1	C	Facultad de Ing. Civil	1917.18	1922.5	0.277
2	N	Centro de cómputo y procesos de información universitaria	629.6	641.7	1.886
3	A	Dirección de servicios generales. Fac. de ingeniería eléctrica.	644.74	658.4	2.075
4	L	Laboratorio de la facultad de físico-matemáticas	994.62	1002.1	0.746
5	B	Facultades de Ing. Civil, fisicomatemáticas y fac. de ing. Eléctrica	1921.28	1938.3	0.878
6	T	Facultad de economía	994.91	996.7	0.18
7	M	Ing. Química. Centro de psicología y psicometría.	2060.93	2067.3	0.308
8	D	Fac. de ing. En tecnología de la madera. Depto de matemática educativa. Cajas de la tesorería de UMSNH.	990	994.3	0.432
9	E	Laboratorio de la facultad de ing. Química	982.54	985.4	0.290
10	F	Laboratorio de materiales FIC	1569.39	1563.8	-0.357



Tabla 8. Comparación de áreas de captación (continúa).

No.	Edificio	Nombre	Área Google Earth	Área Dron	% diferencia
			(m ²)	(m ²)	
11	G	Laboratorio de Eléctrica. Laboratorios de Mecánica	1172.95	1175.7	0.234
12	J	Laboratorios de mecánica	481.76	473.1	-1.830
<13	H	Laboratorio de hidráulica. Fac. de ing civil	4423.31	4475.1	1.157
14	R	Facultad de biología y facultad de historia	1947.39	1950.06	0.137
15	K	Laboratorio de ingeniería química	1369.66	1446.3	5.299
16	O	Fac. de ingeniería en tec. De la madera	1166.68	1165.5	-0.101
17	Anexo	Anexo	418.65	413.2	-1.319
18	X	Laboratorios de docencia de la facultad de biología	349.27	352.9	1.029
19	S1	-	232.96	237.9	2.077
20	S	Biblioteca general de ciudad universitaria	1047.2	1044.9	-0.220
21	Z	Facultad de contaduría y ciencias administrativas	998.33	984	-1.456
22	A5	Facultad de contaduría y ciencias administrativas	1368.65	1340.3	-2.115
23	A4	Facultad de contaduría y ciencias administrativas	1216.09	1211.3	-0.395
24	Nuevo1		-	411.2	-
25	A2	Facultad de contaduría y ciencias administrativas	1211.27	1213	0.143
26	A1	Departamento de idiomas y facultad de arquitectura	1178.89	1175	-0.331
27	A3	Escuela de Bellas Artes	1171.49	1177.2	0.485
28	FA	Facultad de Arquitectura	2638.5	2639.6	0.042
29	B1	Instituto de investigaciones químico-biológicas	357.68	351.5	-1.758
30	B2	Fac. tec. De la madera, Fac. Ing. Química, Fac. Biología	353.85	347	-1.974
31	B3	Instituto de investigaciones químico-biológicas	344.32	344.5	0.052
32	B4	Facultad de biología	340.35	348.7	2.395
33	QB3		50.36	51.4	2.02
34	QB2	Nuevo	278.72	279	0.100
35	Quimico-biolog	Instituto de investigaciones químico-biológicas	401.5	404.4	0.717
36	Omega 1	Facultad de ingeniería eléctrica	654.93	645.4	-1.477
37	U-I	Metalurgia	1062.11	1056.8	-0.502
38	U-II	Metalurgia	357.42	357.4	-0.006
39	U-III	Metalurgia	288.9	285.7	-1.120
40	U-IV	Metalurgia	350.24	350.4	0.046



Tabla 8. Comparación de áreas de captación (continúa).

No.	Edificio	Nombre	Área Google Earth	Área Dron	% diferencia
			(m ²)	(m ²)	
41	C1	Instituto de investigaciones históricas	488.45	494.2	1.163
42	C2	Coordinación de investigación científica	222	220.2	-0.817
43	C3	Instituto de física y matemáticas	425.83	431.1	1.222
44	C4	Facultad de filosofía	493.58	490.6	-0.607
45	C5	Archivo histórico	152.27	156.1	2.454
46	C3A	Instituto de física y matemáticas	207.1	208.5	0.671
47	C3B	Instituto de física y matemáticas	229.03	230.7	0.724
48	C7_A		270.12	270.2	0.030
49	C7	Secretaría de difusión cultural y extensión universitaria	154.09	158.8	2.966
50	C6	Centro de automatización departamento de idiomas CADI	158.02	161.6	2.215
51	CADI	Centro de automatización departamento de idiomas CADI	181.2	179.8	-0.779
52	C8	Instituto de investigaciones históricas	395.99	406.7	2.633
53	Alfa	Físico matemáticas	928.74	923	-0.622
54	Filosofía	Filosofía	741.55	723.8	-2.452
55	Ing. Química	Ingeniería química	1261.94	1259.9	-0.162
56	PIC	Posgrado de ingeniería civil	570.22	569.8	-0.074
57	LAB. IQ	Laboratorio de ingeniería química	286.88	288.8	0.665
58	Anexo PIC	Ingeniería civil	775.56	773.4	-0.279
59	Ω2	Posgrado de ingeniería eléctrica	1153.86	1138.8	-1.32
60	X1		270.41	268.4	-0.749
61	RECTORIA	Rectoría	577.41	577.5	0.016
62	Anexo Ing. Mecánica	Anexo Ingeniería mecánica	149.06	144.4	-3.227
63	Auditorio	Auditorio	2850.5	2873.4	0.797
64	Edificio de documentación y archivo	Edificio de documentación y archivo	800.5	806.1	0.694
65	Aulas multides	Aulas multides	718.18	720.5	0.322
66	Aulas multides II		-	896.9	-
67	Anexo Multides		-	275.1	-
68	x3	x3	135.33	237.5	43.019
69	CIAC	Centro de Información Arte y Cultura	3383.17	3362.6	-0.612
70	Auditorio II	Auditorio	300.21	304.9	1.538
71	Biblioteca Historia	Biblioteca Historia	352.61	351	-0.459
72	Anexo Historia	Anexo Historia	354.76	352.2	-0.727
73	Historia	Historia	712.14	702.6	-1.358
74	IIM	IIM	244.53	246.8	0.920
75	X4	X4	278.46	275.9	-0.928



Tabla 8. Comparación de áreas de captación (continúa).

No.	Edificio	Nombre	Área Google Earth	Área Dron	% diferencia
			(m ²)	(m ²)	
76	Talleres Fac. Bellas Artes	Talleres Ingeniería bellas artes	347.09	341.7	-1.577
77	Biología Acuática	Biología Acuática	1503.55	1564	3.865
<78	X5	X5	88.56	88.9	0.382
79	Q	Direcciones de control escolar y Planeación Universitaria	1145.6	1147.6	0.174
80	P	Facultad de Arquitectura. Oficinas de sesiones de la Reforma Universitaria.	1169	1171	0.171
81	W	Fac. de Ing. Mecánica	1882.6	1871	-0.620
82	Y	Fac. de Contaduría y Ciencias Administrativas	1007.11	1015.6	0.836
83	ECONOMÍA	Edificios de economía	1187.64	1210.8	1.913
84	ININEES	Instituto de Investigaciones Económicas y empresariales	886.48	905.3	2.079
85	Estadio	Estadio de futbol UMSNH	5203.14	5196.5	-0.128
86	Sección A	Techumbre de pasillo	1312.24	1330.1	1.343
87	Sección b	Techumbre de pasillo	1220.48	1218.5	-0.162
88	Sección C	Techumbre de pasillo	1095.46	1071	-2.284

Fuente: Elaboración propia

Con esta nueva medición, se obtuvo un área de captación total de 80,092.76 m² que contempla 3 nuevos edificios (85 en total) y 3 ampliaciones de edificios que no se toman en cuenta con las mediciones de Google Earth. Se compara con los 82 edificios iniciales de Google Earth (sin ampliaciones), la diferencia de área es de 66.69 m². De acuerdo a la comparación del área del edificio C con el área medida en campo por Arreola (2018), se aproxima un error de ± 11.5 m² (0.6 %).

En la Tabla 9, puede observarse las diferencias entre las mediciones. En general, las diferencias más significativas se deben a que se encontraron 3 edificios que fueron ampliados en este periodo de tiempo (Figura 43):

- Edificio K
- Edificio X3
- Biología Acuática



Además, se observó que fueron construidos 3 edificios nuevos (Figura 41 y Figura 42):

- Nuevo 1
- Aulas Multides II
- Anexo Multides



*Figura 41. Nuevos edificios en CU.
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 42. Edificio no actualizado en Google Earth.
Fuente: Elaboración propia.*



Figura 43. Edificio ampliado en CU.
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al coeficiente de escorrentía de los techos, se obtuvo con referencia en la Tabla 2 y la información proporcionada de estas fotografías aéreas sobre el material (Tabla 10):

Tabla 10. Materiales y coeficientes de escorrentía de los edificios de CU.

Material	No. De Edificios	% del total	Coefficiente de escorrentía
Impermeabilizado	65	73.9	0.9
Lámina de acero galvanizada	14	15.9	0.95
Concreto hidráulico	1	1.1	0.9
Mixto	8	9.1	0.95-0.9

Fuente: Elaboración propia.



En general, la mayoría de los edificios en el campus cuentan con impermeabilizante, así como acero de lámina de acero galvanizada. Esto significa que, del 100% de agua de lluvia que cae en los edificios, más de un 90% puede ser aprovechada para la captación de agua de lluvia, de acuerdo al coeficiente de escurrimiento.

7.4. Condiciones de azoteas

De acuerdo a las características del área de captación como componente de un SCALL, mencionados en el apartado 2.9.1, es de suma importancia atender a las condiciones de las superficies de captación debido a que los materiales de los techos tienen un efecto en relación a la calidad del agua recolectada.

Mendez et al. (2010) estudiaron el efecto de diversos materiales de techos en la calidad del agua. Así, se determinó que los techos de lámina, al igual que techos de concreto tienden a tener menores concentraciones de bacterias indicadoras fecales, en comparación de otros materiales (por ejemplo, tejas de fibra de vidrio).

Asimismo, Farreny et al. (2011), realizaron evaluaciones en cantidad y calidad en la selección de techos para la recolección de agua de lluvia, proporcionando criterios para su selección. Entre otras cosas, se encontró que existen diferencias entre los techos inclinados y planos para algunos parámetros de calidad del agua, ya que los techos inclinados presentaron mejor calidad debido a un menor grado de deposición de partículas.

En el análisis cualitativo de las áreas de captación o azoteas de edificios del presente proyecto, se evaluó el efecto que tienen los materiales de los techos y las condiciones actuales de los mismos (objetos, obstáculos, estado de mantenimiento) con la información de calidad del agua proporcionada por estudios anteriores.



De acuerdo al estudio “Muestreo y análisis de agua de lluvia para su aprovechamiento en las instalaciones de C.U. de la UMSNH” de Arreola (2015), se tomaron muestras simples de siete edificios (Tabla 11) a lo largo de ciudad universitaria, tomando en cuenta que estos representaran los espacios de terreno del área, que fueran de buen tamaño y representativos.

Tabla 11. Edificios para el muestreo de agua de lluvia en CU.

No.	Edificio	Nombre
1	A2	Facultad de contaduría y ciencias administrativas
2	B1	Instituto de investigaciones químico-biológicas
3	F	Laboratorio de materiales FIC
4	C2	Coordinación de investigación científica
5	J	Laboratorios de mecánica
6	PIC	Posgrado de ingeniería civil
7	Anexo PIC	Ingeniería civil (anexo de posgrado)

Fuente: Arreola (2015).

Las muestras fueron analizadas de acuerdo a la “Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización” en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la UMSNH, los resultados se muestran en la Tabla 12:

Tabla 12. Resumen de resultados de calidad de agua techos de CU.

No.	pH	Coliformes totales	Cloruros	Color	Sólidos	Dureza	Sulfatos	Turbiedad	Fluoruros	Aluminio	Bario	Cadmio	Cobre	Cromo	Manganes	Plomo	Zinc
1	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	X	X	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	✓	X	✓	X	X	✓	✓	X	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	✓	X	✓	X	X	✓	✓	X	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Nota: ✓ Cumple con el límite permisible X No cumple con el límite permisible

Fuente: Arreola (2015).



Cabe resaltar que todas las muestras no cumplieron con el parámetro de Coliformes totales, que son una señal de contaminación de materia fecal. Esto puede deberse a las aves que habitan en los árboles circundantes a los edificios. Por otra parte, el parámetro de Bario, un metal que puede causar riesgos en la salud, no cumplió con la norma en todas las azoteas. El bario puede encontrarse, derivado de desechos industriales, pigmentos, pirotecnia, entre otros. Por lo cual, en el trabajo antes mencionado, se recomendó la verificación con otro método.

Al momento del estudio, no se tuvo acceso a las azoteas de los edificios seleccionados, por lo cual no se pudieron verificar las condiciones ni los materiales de las mismas. Debido a lo anterior, para conocer las condiciones en las que se encuentran los edificios, se analizaron las fotografías aéreas obtenidas con el dron, lo cual además nos permite realizar las respectivas recomendaciones para la implementación de un sistema de captación en estos edificios.

En el caso de los edificios analizados por Arreola (2015), las características fueron las siguientes:

Tabla 13. Características de azoteas de edificios analizados por Arreola (2015).

No.	Edificio	Material	Estado de mantenimiento	Obstáculos	Foto
1	A2	Techo plano impermeabilizado	Bien	Pocos árboles	
2	B1	Techo plano impermeabilizado	Regular	Pocos árboles	



Tabla 12. Características de azoteas de edificios analizados por Arreola (2015) (Continúa).

No.	Edificio	Material	Estado de mantenimiento	Obstáculos	Foto
3	F	Techo impermeabilizado, cubierta dientes de sierra	Bien	Rodeado de árboles/ objetos y estructura metálica	
4	C2	Techo plano impermeabilizado	Regular	Pocos árboles	
5	J	Lámina de acero galvanizada	Muy bien	No	
6	PIC	Lámina de acero galvanizada	Muy bien	Pocos árboles	
7	Anexo PIC	Lámina de acero galvanizada	Muy bien	No	

Fuente: Elaboración propia.



De acuerdo a los resultados de los análisis de agua y las fotografías obtenidas de los techos, se describe a continuación la relación con la calidad del agua:

- El edificio A2 se encuentra en buenas condiciones (sin deterioro de impermeabilizante ni muchas hojas de los árboles que pudieran alterar su calidad del agua). Sus resultados de calidad del agua no muestran exceso de sólidos, así como color verdadero ni turbidez que indiquen la acumulación de sustancias disueltas o materia orgánica en el techo.
- El edificio B1, tiene condiciones regulares de mantenimiento, debido a que una parte del impermeabilizante se encuentra deteriorado. La muestra de agua en este edificio no cumple con la normatividad en cuanto a turbiedad, esto puede ser debido a la presencia de partículas en suspensión en una zona de encharcamiento en donde se pueden acumular sustancias (del impermeabilizante) y la acumulación de sólidos. Por otra parte, se acumulan las hojas de los árboles circundantes.



*Figura 44. Vista de azotea Edificio B1.
Fuente: Elaboración propia.*



- El edificio F, tiene una cubierta de dientes de sierra con un estado de mantenimiento bueno. Aunque se encuentra rodeado de árboles, las hojas y partículas no se acumulan en la azotea, por lo cual cumple la normatividad en sólidos totales y no se genera turbiedad ni altera el color verdadero. Esto puede deberse a la inclinación que tiene, ya que se genera menor deposición de partículas, como menciona Farreny et al. (2011).
- El edificio C2, tiene un techo plano impermeabilizado, con condiciones de mantenimiento regulares, debido a que una parte de ésta se encuentra un encharcamiento de agua, donde el impermeabilizante se encuentra deteriorado. Esto puede ser debido a la presencia de hojas de los árboles que tapan las bajadas de agua pluvial. La calidad del agua en esta azotea, además de los Coliformes totales y Bario, no cumple con los parámetros de pH y color verdadero. Su pH es ligeramente ácido, por lo que esto puede deberse a la presencia de alguna sustancia que desprenden los materiales, a causa del arrastre del agua de lluvia. Por otra parte, el color verdadero en el agua indica la presencia de sustancias disueltas (filtrables) de origen orgánico e inorgánico, resultado de las sustancias u objetos que se encuentran en la azotea, como las hojas de los árboles. Además, la azotea tiene una antena parabólica y tanques de asbesto.



*Figura 45. Estado de la azotea edificio C2.
Fuente: Elaboración propia.*



- El edificio J es de lámina de acero galvanizada y se encuentra en muy buenas condiciones de mantenimiento. En éste, no hay árboles circundantes, por lo que las hojas de los árboles no afectan el parámetro de color verdadero. En los resultados de calidad del agua, además de los Coliformes totales y el Bario, el pH fue ligeramente ácido, sin embargo, no hay objetos en la azotea que puedan desprender alguna sustancia que altere el pH. Este resultado puede deberse al momento de la toma de muestras, o como resultado del lavado en las primeras lluvias.
- El edificio de PIC es de lámina de acero galvanizada con un buen estado de mantenimiento. Sin embargo, la calidad de agua muestra que no cumple con los parámetros de color verdadero, sólidos totales y turbiedad. Esto puede deberse a la presencia de hojas de los árboles y la deposición de partículas en la azotea.
- El edificio anexo PIC, es de lámina de acero galvanizada y se encuentra en muy buenas condiciones de mantenimiento y no tiene presencia de obstáculos. Sin embargo, los resultados de calidad del agua indicaron que no cumple con los parámetros de color verdadero, sólidos y turbiedad. En ese sentido, no puede deberse a la acumulación de partículas y su arrastre, resultado de las primeras lluvias durante el muestreo.

Por otro lado, de manera similar en las azoteas de Ciudad Universitaria, se describieron los obstáculos presentes, los cuales son principalmente árboles que cubren parte de las áreas de captación y pueden intervenir en la obstrucción de tuberías y la calidad del agua por la introducción de materia orgánica (Figura 46).

De igual forma, se describió el estado de mantenimiento en el que se encuentran (con base en la limpieza, el impermeabilizante y los objetos que pudieran alterar la calidad del agua) (Figura 48).

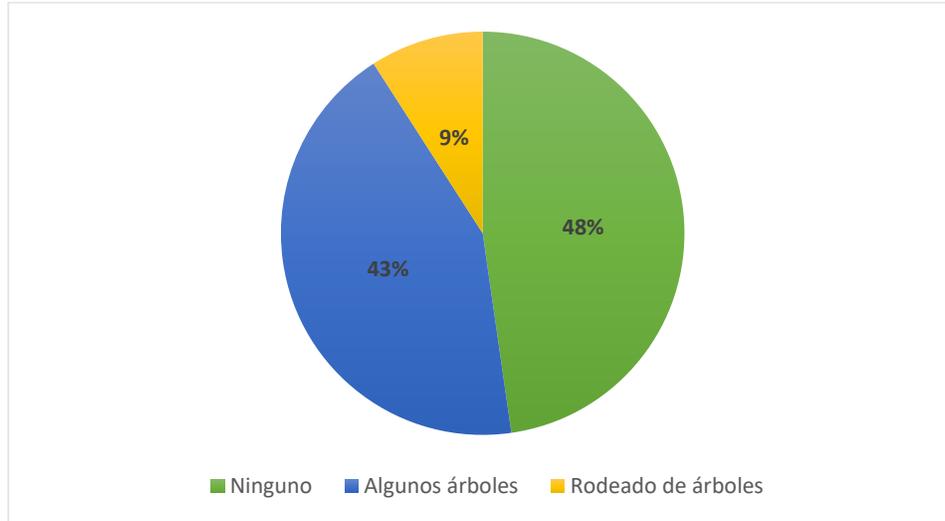


Figura 46. Obstáculos en edificios de C.U.
Fuente: Elaboración propia.

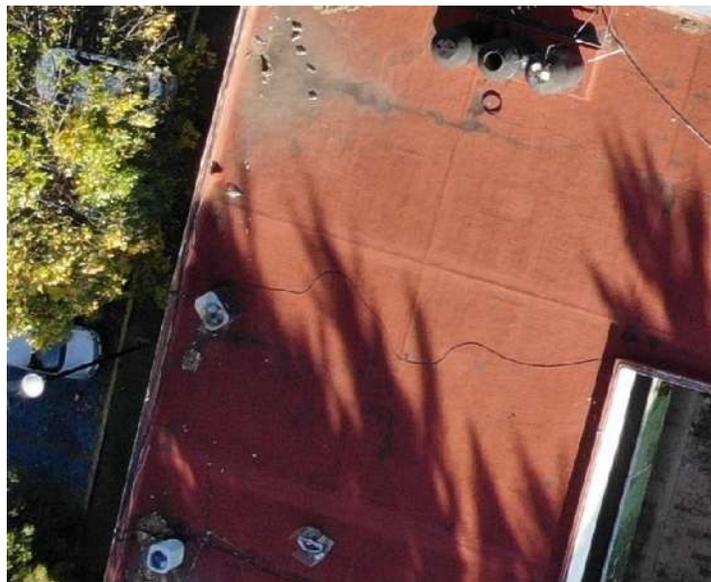


Figura 47. Falta de mantenimiento en edificio T CU.
Fuente: Elaboración propia.



Con esta información, se conoció la cantidad de azoteas de edificios que se encuentran en buen estado de mantenimiento, donde más del 50% se encuentran en condiciones muy buenas y buenas (Figura 47). Por otra parte, el resto fue clasificado como condiciones regulares (41%) y malas (4). Esta clasificación se hizo de acuerdo a los siguientes criterios:

- Muy bien: azoteas libres de objetos u obstáculos como árboles, con impermeabilizante en buenas condiciones o material de lámina galvanizada en buen estado, limpios, sin acumulación de agua.
- Bien: Azoteas impermeabilizadas libres de objetos, sin obstáculos, con poca suciedad.
- Regulares: pocos obstáculos (uno o dos árboles localizados en una esquina de la azotea), impermeabilizante ligeramente degradado.
- Malas: azoteas rodeadas completamente por árboles, con encharcamientos localizados, objetos (estructuras metálicas, antenas, latas), impermeabilizante degradado y falta de limpieza.

Esto nos da una idea de las recomendaciones para poder implementar sistemas de captación de agua de lluvia en las azoteas.

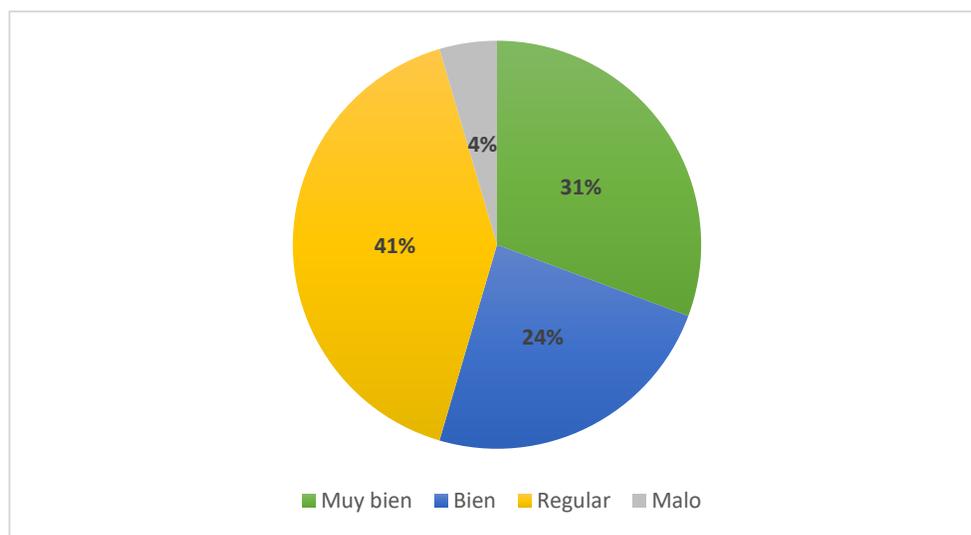


Figura 48. Estado de mantenimiento en edificios de CU.
Fuente: Elaboración propia.



En cuanto a la pendiente y bajadas de agua pluvial, las fotografías permitieron observar que un 90% los edificios cuentan con bajadas de agua pluvial visibles con pendiente para el desalojo de agua. En estos, se incluyen las “gárgolas” que se utilizan para que el agua de lluvia de los techos desaloje a los jardines (Figura 49).

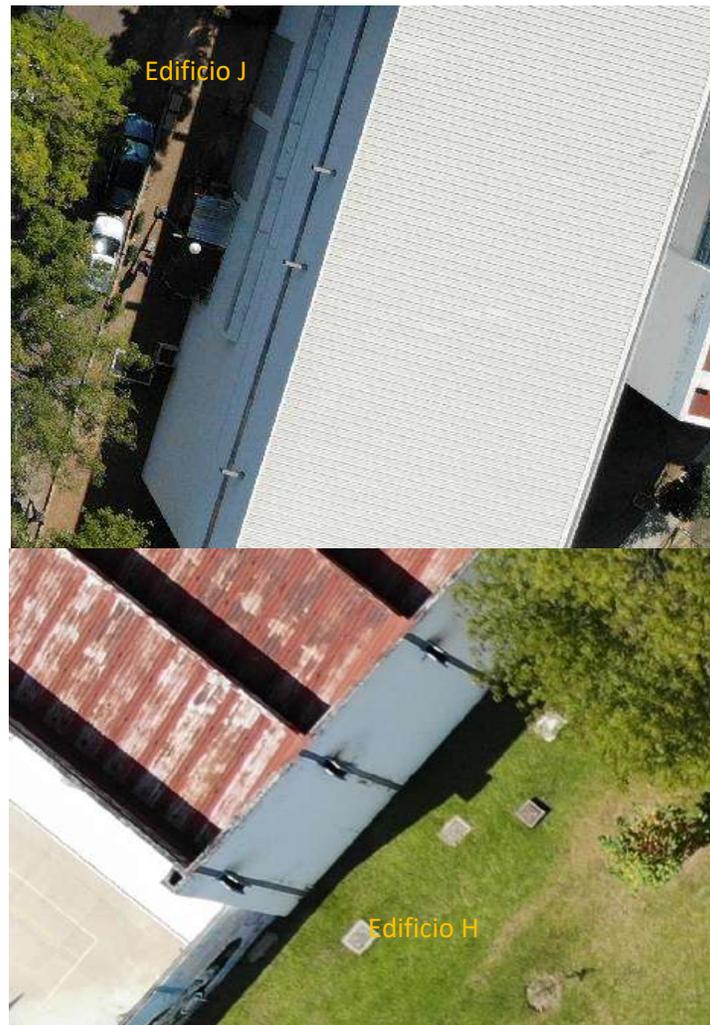


Figura 49. Gárgolas para desalojo de agua de lluvia en edificios de C.U.
Fuente: Elaboración propia.



7.5. Estimación del consumo de agua

Para conocer cuánta agua se requiere para abastecer necesidades, se estimó el consumo unitario de este recurso a través de información de los departamentos correspondientes sobre:

- Cantidad de usuarios promedio al día
- Periodo de consumo (días)
- Usos del agua

Para conocer el consumo de agua en CU, se acudió a los departamentos de Planeación Institucional, Servicios Generales y Dirección de Obras para obtener información acerca del consumo de agua en el campus (como recibos de agua).

Sin embargo, esta información se desconoce dado que se maneja de manera independiente en cada edificio y no se tiene un registro disponible. De igual forma, se recomendó obtener información del Organismo Operador de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Morelia (OOAPAS) quienes se encargan del abastecimiento del agua.

El campus cuenta con un pozo de abastecimiento de agua potable (Figura 50), localizado al sur de CU llamado pozo No.2, localizado a 1917 msnm a una profundidad de 74 metros y un nivel piezométrico de 1843 (altura de la superficie libre de agua sobre el nivel del mar) (Garduño et al., 2014).

No obstante, este pozo no solo abastece ciudad universitaria, sino también a cuatro colonias de la ciudad: Morelos, Díaz Ordaz, Nueva Valladolid e Infonavit Cepamisa. Por lo cual, la información sobre su uso no es exclusivo del campus.

En un acercamiento con trabajadores técnicos del OOAPAS, nos comentaron un consumo aproximado del campus de 18 l/s y 46 l/s para las colonias aledañas.

Debido a que no se cuenta con la información exacta, se estimó el consumo de agua a través de la información disponible.



Figura 50. Pozo No. 2 OOAPAS en CU.
Fuente: Elaboración propia.

Si se utilizara un criterio oficial de diseño de dotación de agua para escuelas de nivel superior, se tendría que considerar 60 litros/usuario según el INIFED (Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa) (2014) en las Normas y Especificaciones para Estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones para instalaciones hidrosanitarias.

Con un enfoque realista, el consumo determinado por Arreola (2018) que, en un estudio realizado en la UMSNH, se determinó que el consumo real (medido *in situ*) de agua de los usuarios en el edificio C es de 2.6 litros/usuario/día. Sin embargo, las condiciones en las cuales se tomaron estos datos han cambiado, ya que se habilitó el último piso y los baños se utilizan con mayor frecuencia.

Por lo cual, se tomó una segunda medición del edificio de acuerdo al consumo semanal en un periodo de clases habitual. Estos fueron tomados a partir del medidor del edificio C, durante cuatro semanas. Los resultados fueron los siguientes (Tabla 14):



Tabla 14. Consumo de agua semanal en edificio C (actualizado).

Semana	fecha	volumen m ³	Acumulado m ³
0	28/02/2020	6599	0
1	06/03/2020	6637	38
2	13/03/2020	6698	61
3	20/03/2020	6740	42
promedio			47

Fuente: Elaboración propia.

El consumo de agua obtenido semanalmente era de 25 m³ (25,000 litros), sin embargo, con la medición actualizada se obtienen 47 m³ y, tomando en cuenta que los alumnos en el edificio son 1, 780, el consumo de agua es de 5.28 l/usuario al día. Esto se considera un número más cercano a la realidad, en comparación con las recomendaciones teóricas para el diseño. En cuanto a la ocupación en el campus de CU, se desglosa en la Tabla 15 la relación de usuarios:

Tabla 15. Número de alumnos por disciplina académica en el Campus de CU de la UMSNH.

Disciplinas	Total de alumnos
Biológico Agropecuarias Morelia	2684
Ciencias Económico Administrativas	4235
Metalurgia, Materiales y Ciencias Exactas	323
Humanidades	1439
Ingeniería y Arquitectura	6417
Especialidad	101
Maestrías	1119
Doctorados	548

Fuente: Serna (2018) con información de Dirección de Control Escolar, corte al 8 de noviembre del 2018.

En total, se calcularon 16, 886 alumnos de acuerdo a las disciplinas impartidas en el campus (sin tomar en cuenta la licenciatura en Derecho ni las Ciencias de la Salud, así como otros campus como Apatzingán y Uruapan) que corresponden a los estudiantes matriculados del periodo 2018-2019.



En el Cuarto Informe del Rector de Serna (2018) también se encontraron datos de la cantidad de docentes, donde se cuenta con 2,939 académicos en activo, entre profesores de asignatura, ayudantes de técnico académico, técnicos académicos y profesores investigadores de tiempo completo y medio tiempo. Sin embargo, no especifica cuáles de ellos se encuentran específicamente laborando en Ciudad Universitaria.

Para aproximar este dato, se consideró un 10% de personal docente y administrativo en relación con el número de alumnos, sumando un total de 18, 575 usuarios. En el caso del periodo de consumo, se tomó en cuenta el calendario escolar calendario escolar UMSNH 2019-2020, considerando 5 días hábiles por semana, periodos vacacionales y fechas de suspensión oficiales.

Tabla 16. Periodos de consumo mensual, según calendario 2019-2020 UMSNH.

Mes	Días Hábiles
Enero	18
Febrero	18
Marzo	21
Abril	12
Mayo	20
Junio	22
Julio	13
Agosto	22
Septiembre	20
Octubre	23
Noviembre	20
Diciembre	15

Fuente: Información de Control Escolar UMSNH.

El agua que se utiliza en el campus tiene diversos usos. En este caso, la investigación se enfoca a los usos internos dentro de los edificios, los cuales son:

- Higiene personal: lavado de manos y rostro.
- Sanitarios: uso de WC y mingitorios.
- Mantenimiento de los salones de clases: labores de limpieza.



7.6. Capacidad instalada de almacenamiento en el campus

Para complementar esta investigación, se realizó un recorrido para estimar (de manera general) la capacidad instalada que tiene el campus de CU para el almacenamiento de agua (Figura 51). Se contabilizaron las cisternas con apoyo del personal de plomería, con experiencia y conocimiento de la ubicación exacta de cada uno de ellos. Los resultados fueron los siguientes (Tabla 17):

Tabla 17. Capacidad instalada de almacenamiento de agua CU.

No. de cisterna	Edificio (s)	Capacidad instalada aproximada m ³
1	C	11
2	N	1.8
3	A y B	22.4
4	L	9.38
5	T	8.75
6	M y P	22.4
7	D	8
8	E	20
9	F	5.2
10	G	12.93
11	J	23.4
12	H	229.9
13	R	10.56
14	O	30
15	X y S	46.25
16	Z y Y	102.56
17	A5	32
18	A4	18
19	A2	6.4
20	A1	9
21	A3	18
22	FA	22
23	B1	13.2



Tabla 16. Capacidad instalada de almacenamiento de agua CU. (Continuación)

No.	Edificio	Capacidad instalada aproximada m ³
24	B2	11.7
25	B3	6.4
26	B4	11.7
27	Quimico-biolog A1'	10
28	U-I	92
29	U-III	10
30	C1	13.5
31	C2	6
32	C3	9
33	C4	13.5
34	C5	6
35	C3A	6
36	C6	9
37	CADI	9
38	C8	6
39	Filosofía	4.5
40	Ing. Química	13.5
41	PIC	9
42	Anexo PIC	13.5
43	Ω2	54
44	RECTORIA	12.25
45	Auditorio	24
46	Edificio de documentación y archivo	18
47	Aulas multiDes	13.5
48	x3	12
49	CIAC	15
50	Anexo Historia	24



Tabla 16. Capacidad instalada de almacenamiento de agua CU. (Continuación)

No.	Edificio	Capacidad instalada aproximada m ³
51	Historia	12
52	Biología Acuática	13.5
53	Q	4
54	W	13.5
55	ECONOMÍA	21
56	ININEES	10
57	Estadio	100
	Total	1290.17

Fuente: Elaboración propia.



Figura 51. Localización de cisternas existentes en CU.

Fuente: Elaboración propia.



En total, la capacidad instalada para el almacenamiento de agua es de 1290.17 m³ (1,290,170 litros). Se observó que todo el almacenamiento se realiza por medio de cisternas enterradas, que no afectan el paisaje del campus y se encuentran distribuidas uniformemente.

Por otra parte, cabe destacar que no todas las cisternas se encontraron en buen estado de mantenimiento (Figura 52 y Figura 53): alrededor del 20% se encontraron bien, otro 30% regular, 30% mal y otro 20% muy mal. Esto debido a que se encontraron cisternas con tapas oxidadas, falta de limpieza, desuso o algunas en donde las raíces de los árboles e insectos habían invadido.



*Figura 52. Cisterna edificios Economía.
Fuente: Elaboración propia.*

Estas cisternas de almacenamiento ya instaladas proporcionan una opción viable para almacenar el agua sin tener que construir tanques de almacenamiento en el campus. Sin embargo, para su uso debe considerarse el mantenimiento necesario para mejorar las condiciones actuales en las que se encuentran las cisternas para no alterar la calidad del agua.



En la figura 54.A, se muestra una cisterna de almacenamiento en buen estado de mantenimiento. Es decir, el agua se ve clara, no hay objetos ajenos en su interior, los materiales parecen no presentar filtraciones, y su entrada se encuentra ligeramente elevada del suelo, por lo cual no se arrastran sedimentos durante las lluvias.

Por otra parte, en la Figura 54.B, se muestra una cisterna en mal estado de mantenimiento, donde las raíces de las plantas circundantes ya alcanzaron el interior del mismo, aportando materia orgánica al agua. Además, al estar al nivel del suelo, las hojas y el suelo son arrastrados a su interior. Otro detalle es que la tapa principal se encuentra evidentemente oxidada, lo que con el tiempo le aporta sedimentos de óxido al agua que puede ser dañino para la salud.



*Figura 53. A) Cisterna en buen estado de mantenimiento. B) Cisterna en mal estado de mantenimiento.
Fuente: Elaboración propia.*



8. Resultados

8.1. Volumen de captación y almacenamiento

De acuerdo a los valores de la precipitación, el área de captación y el coeficiente de escorrentía de cada edificio, se realizaron los cálculos respectivos para obtener el volumen de captación, la demanda de agua y el volumen de almacenamiento en periodos mensuales en C.U.

En ese sentido, se plantearon escenarios de aprovechamiento de agua de lluvia de acuerdo a las áreas de captación y la capacidad de almacenamiento. Esto toma en cuenta también la infraestructura actual disponible para almacenamiento en el campus.

Debido a que es un planteamiento general de todo el campus, no se analizaron aspectos específicos de cada edificio, así como el planteamiento técnico de cada uno. Estos escenarios, nos sirven para estimar ese potencial que existe de aprovechamiento de agua de lluvia total en el sitio de estudio que, posteriormente, puede ser objeto de estudio de forma puntual en cada edificio.

8.1.1. Escenario 1

En este primer escenario, se plantea utilizar toda el área de captación de las azoteas de CU, bajo los siguientes parámetros (Tabla 18):

Área total: 80,092.76 m² **Consumo:** 5.28 l/usuario/día
Tanque de almacenamiento: Sin restricción.

Con esta información, la demanda anual total es de 21,969 m³ de agua. Asimismo, se obtuvo información de la satisfacción del agua de lluvia en relación a la demanda:



Tabla 18. Escenario 1. Simulación de agua de lluvia, uso del 100% del área.

Mes	Precipitación mm	Captación de lluvia m ³	Demanda de agua m ³	Volumen acumulado m ³
				0
Junio	135.52	9959	2158	7801
Julio	182.9	13440	1275	19966
Agosto	168.66	12394	2158	30202
Septiembre	136.5	10031	1962	38271
Octubre	57.28	4209	2256	40225
Noviembre	11.77	865	1962	39128
Diciembre	2.72	200	1471	37857
Enero	11.45	841	1765	36933
Febrero	14.4	1058	1765	36226
Marzo	12.52	920	2060	35086
Abril	10.78	792	1177	34701
Mayo	46.2	3395	1962	36135

Tabla 19. Balance de agua de lluvia Escenario 1.

Mes	Agua de lluvia utilizada m ³	Satisfacción de la demanda con agua de lluvia %	Agua aprovechada anual m ³	Aportación a la demanda con agua de lluvia %
Junio	2158	100	21,969	100
Julio	1275	100		
Agosto	2158	100		
Septiembre	1962	100		
Octubre	2256	100		
Noviembre	1962	100		
Diciembre	1471	100		
Enero	1765	100		
Febrero	1765	100		
Marzo	2060	100		
Abril	1177	100		
Mayo	1962	100		



De acuerdo a esta primera simulación, en donde se puede almacenar toda el agua de lluvia captada, se podría disponer completamente de agua de lluvia durante todo el año para los usos necesarios en los edificios. Esto también indica un volumen máximo para almacenar de $40,225 \text{ m}^3$, es decir, 40,225,000 de litros de agua. Sin embargo, es un volumen muy grande y se necesitaría una gran cantidad de tanques de almacenamiento para cubrirlo, sin mencionar también la infraestructura para la instalación de un SCALL en cada edificio.

Por otra parte, en este escenario se obtiene un remanente de $36,135 \text{ m}^3$ al final del mes de mayo, por lo cual, este excedente de agua puede ser destinado para el riego de áreas verdes en el campus. A pesar de que en este escenario se puede aprovechar toda el agua de lluvia para satisfacer la demanda, no es realista, ya que no cuenta con restricción en el almacenamiento. Para ello, es necesario tomar en cuenta una capacidad de almacenamiento existente.

Las **ventajas** del Escenario 1 son:

- Nos da una idea de potencial de agua que se puede captar, con el uso de todas las azoteas del campus, de acuerdo a los parámetros obtenidos, como la demanda de agua, la precipitación, áreas y coeficientes de escurrimiento.
- En este caso, se satisface en un 100 % la demanda estimada durante todo el año, lo cual es suficiente para el uso en sanitarios, limpieza e higiene personal en los edificios.
- Al final del ciclo anual, nos queda un remanente de $36,135 \text{ m}^3$ de agua, que pueden ser empleados para el riego de áreas verdes en el campus.

Las **desventajas** del Escenario 1 son:

- No toma en cuenta un tamaño de almacenamiento real, es decir, uno que pueda construirse en el campus (ya que su volumen máximo para almacenar supera los $40,000 \text{ m}^3$).



- En este caso, se tendrían que construir sistemas de captación para todas las azoteas, además de tener un mayor costo debido a la construcción de tanques de almacenamiento en el campus.
- Para la construcción de tanques, se tendría que gestionar además su tamaño y distribución a lo largo del campus, así como la instalación de sistemas de bombeo para distribuir el agua.

8.1.2. Escenario 2

En este escenario, se plantea el uso del 100% de las áreas de Ciudad Universitaria y la capacidad instalada que ya se tiene para el aprovechamiento de agua de lluvia (apartado 7.6), bajo los siguientes parámetros (Tabla 20):

Área total: 80,092.76 m² **Consumo:** 5.28 l/usuario/día
Tanque de almacenamiento: 1290 m³

Tabla 20. Escenario 2. Simulación de agua de lluvia, uso del almacenamiento disponible en el campus.

Mes	Precipitación mm	Captación de lluvia m ³	Demanda de agua m ³	Volumen de agua en el almacenamiento al final del ciclo m ³
				0
Junio	135.5	9957	2158	1290
Julio	182.9	13440	1275	1290
Agosto	168.7	12397	2158	1290
Septiembre	136.5	10031	1962	1290
Octubre	57.2	4203	2256	1290
Noviembre	11.8	867	1962	196
Diciembre	2.7	198	1471	0
Enero	11.5	845	1765	0
Febrero	14.4	1058	1765	0
Marzo	12.5	919	2060	0
Abril	10.8	794	1177	0
Mayo	46.2	3395	1962	1290



En este segundo escenario, se plantea como límite la capacidad instalada de 1290 m³. En este caso, el volumen al final del ciclo varía, dependiendo de la cantidad de agua de lluvia que cae y el agua que se demanda. Por lo cual, a partir del mes de diciembre, donde se tiene una captación de agua de lluvia de 198 m³ y 196 m³ de agua almacenada, ya no se satisface por completo la demanda durante los siguientes meses y no se almacena agua al final del ciclo. En el caso del mes de mayo, la captación de agua de lluvia es suficiente para satisfacer la demanda y además cubrir el almacenamiento.

Por otra parte, en la Tabla 20, se realiza un balance de agua de lluvia donde se muestra el porcentaje de satisfacción de la demanda a lo largo de los meses. La aportación a la demanda durante el año es del 80%, con un aprovechamiento de 17,544 m³ (17,544,000 litros), donde se satisface en un 100% la demanda de los meses de mayo a noviembre.

Tabla 21. Balance de agua de lluvia Escenario 2.

Mes	Satisfacción		Agua de lluvia aprovechada anual m ³	Aportación a la demanda %
	Agua de lluvia utilizada m ³	de la demanda con agua de lluvia %		
Junio	2158	100	17,544	80
Julio	1275	100		
Agosto	2158	100		
Septiembre	1962	100		
Octubre	2256	100		
Noviembre	1962	100		
Diciembre	198	13		
Enero	845	48		
Febrero	1058	60		
Marzo	919	45		
Abril	794	67		
Mayo	1962	100		



Este escenario incluye el uso de todas las azoteas para la captación de agua de lluvia, lo que implica instalaciones de captación para cada edificio. Es decir, bajo estas condiciones, se tendría que invertir en sistemas de conducción y mantenimiento para para todas las azoteas.

Las **ventajas** del Escenario 2 son:

- Se utiliza el almacenamiento existente, es decir, 57 cisternas de almacenamiento de agua, distribuidas a lo largo de Ciudad Universitaria (Figura 51).
- En ese caso, al cubrir el 80% de la demanda, no se tendría que recurrir a la inversión y construcción de nuevas cisternas de almacenamiento.
- El agua puede ser empleada para los usos principales dentro de los edificios, aprovechando al máximo el agua de lluvia captada y disminuyendo el uso del agua proveniente de la red de agua potable.

Las **desventajas** del Escenario 2 son:

- Al emplear el almacenamiento existente, es necesario dar mantenimiento a más de la mitad de las cisternas identificadas, para para evitar que se altere la calidad de agua.
- El uso del 100% de las azoteas implica la instalación de tuberías y bajantes, así como filtros e interruptor de primeras lluvias en cada uno de los 85 edificios.
- Cada azotea debe recibir el mantenimiento necesario, principalmente los clasificados con condiciones regulares y malas (Figura 48).



8.1.3. Escenario 3

En este escenario, se plantea el uso de sólo el 50% de las áreas de Ciudad Universitaria para el aprovechamiento de agua de lluvia y la capacidad instalada de almacenamiento de agua, bajo los siguientes parámetros (Tabla 22):

Área total: 40,046.38 m² **Consumo:** 5.28 l/usuario/día
Tanque de almacenamiento: 1290 m³

Tabla 22. Escenario 3. Aprovechamiento de agua de lluvia.

Mes	Precipitación mm	Captación de lluvia m ³	Demanda de agua m ³	Volumen de agua en el almacenamiento al final del ciclo m ³
				0
Junio	135.5	4979	2158	1290
Julio	182.9	6720	1275	1290
Agosto	168.7	6198	2158	1290
Septiembre	136.5	5015	1962	1290
Octubre	57.2	2102	2256	1136
Noviembre	11.8	434	1962	0
Diciembre	2.7	99	1471	0
Enero	11.5	423	1765	0
Febrero	14.4	529	1765	0
Marzo	12.5	459	2060	0
Abril	10.8	397	1177	0
Mayo	46.2	1697	1962	0

En este escenario, utilizando el 50% de las áreas de captación, se tendría agua de lluvia para aprovechar durante cinco meses (junio a octubre) tomando en cuenta la capacidad instalada. A partir del mes de noviembre, la cantidad de agua captada de 434 m³ y la cantidad almacenada en el mes anterior, de 1,136 m³, no logran satisfacer la demanda, por lo cual no se almacena agua para los siguientes meses.



De igual forma, en la (Tabla 23), se obtuvo el balance del agua de lluvia en relación a la demanda:

Tabla 23. Balance de agua de lluvia Escenario 3.

Agua de lluvia utilizada m ³	Satisfacción de la demanda con agua de lluvia %	Agua de lluvia aprovechada anual m ³	Aportación a la demanda %
2158	100%	14,982	68
1275	100%		
2158	100%		
1962	100%		
2256	100%		
1570	80%		
99	7%		
423	24%		
529	30%		
459	22%		
397	34%		
1697	87%		

Lo anterior, nos indica que, en este escenario, el agua de lluvia aportaría un 68% a la demanda durante el año, cubriendo un 100% en los meses de junio a octubre, con un aprovechamiento anual de 14,982 m³ (14,982,000 litros). Con este escenario, no se tendrían que instalar canaletas y bajantes en todos los edificios.

Las **ventajas** del Escenario 3 son:

- Al utilizar sólo el 50% de las áreas de captación, se elegirían las azoteas de edificios clasificados como “Muy bien” y “Bien” (que corresponden al 55% del total) (Figura 48). Por lo cual, no se tendría que dar mucho mantenimiento a las azoteas, es decir, las labores de retiro de hojas, limpieza, renovar impermeabilizante, etc.



- Durante los meses de junio a octubre, se podría depender al 100% del agua de lluvia, sin utilizar el servicio de agua potable, para fines de usos dentro de los edificios.
- En este escenario, al emplear el 50% de las azoteas, también se reducirían los costos por la instalación de canaletas y bajantes, así como interceptor de primeras aguas y filtros para cada edificio.

Las **desventajas** del escenario 3 son:

- Al emplear todo el almacenamiento existente, es necesario dar el mantenimiento adecuado a las cisternas, para evitar que se altere la calidad del agua en su interior.
- No se podría depender de la captación de agua de lluvia la mayor parte del año.
- Al usar el 50% de las azoteas y el 100% del almacenamiento, se tendrían que hacer los ajustes necesarios para distribuir el agua captada en esas azoteas hacia las cisternas más cercanas.

8.1.4. Escenario 4

En este escenario, se planteó la construcción de tanques de almacenamiento que complementen el almacenamiento necesario para aprovechar el agua de lluvia suficiente para satisfacer la demanda todo el año en Ciudad Universitaria, considerando la capacidad de almacenamiento actual.

Área total: 80,092.76 m² **Consumo:** 5.28 l/usuario/día
Tanque de almacenamiento: 1290 m³ (actual) + 4,229 m³ (futura)



Tabla 24. Escenario 3. Aprovechamiento de agua de lluvia.

Mes	Precipitación mm	Captación de lluvia m ³	Demanda de agua m ³	Volumen de agua en el almacenamiento al final del ciclo m ³
				0
Junio	135.5	9957	2158	5519
Julio	182.9	13440	1275	5519
Agosto	168.7	12397	2158	5519
Septiembre	136.5	10031	1962	5519
Octubre	57.2	4203	2256	5519
Noviembre	11.8	867	1962	4425
Diciembre	2.7	198	1471	3152
Enero	11.5	845	1765	2232
Febrero	14.4	1058	1765	1525
Marzo	12.5	919	2060	383
Abril	10.8	794	1177	0
Mayo	46.2	3395	1962	1434

Tabla 25. Balance de agua de lluvia Escenario 3.

Mes	Agua de lluvia utilizada m ³	Satisfacción de la demanda con agua de lluvia %		Agua de lluvia aprovechada anual m ³	Aportación a la demanda %
Junio	2158	100%		21,969	100
Julio	1275	100%			
Agosto	2158	100%			
Septiembre	1962	100%			
Octubre	2256	100%			
Noviembre	1962	100%			
Diciembre	1471	100%			
Enero	1765	100%			
Febrero	1765	100%			
Marzo	2060	100%			
Abril	1177	100%			
Mayo	1962	100%			



Bajo este escenario, se plantea la construcción de 4, 229 m³ de infraestructura de almacenamiento, como complemento para satisfacer en un 100% la demanda de agua. Es decir, se necesita un total de 5, 519 m³ en total de almacenamiento para poder abastecer de agua a los edificios del campus durante todo el año.

Este tamaño de almacenamiento incrementa considerablemente en comparación del almacenamiento existente debido a que, durante los meses de noviembre hasta abril, la captación de agua de lluvia es mucho menor (con un mínimo de 198 m³ en diciembre), por lo cual, se necesita un mayor volumen de almacenamiento para poder abastecer durante esos meses.

Las **ventajas** del escenario 4 son:

- Bajo este escenario, se lograría la autonomía en cuestiones de abastecimiento de agua para todos los edificios, sin depender de la red de distribución de agua.
- El agua obtenida puede ser utilizada para uso en los sanitarios, limpieza y aseo personal de los usuarios del campus.

Las **desventajas** del escenario 4 son:

- Se necesitaría dar mantenimiento de todas las azoteas y las cisternas.
- La construcción de sistemas de captación de agua de lluvia en todos los edificios del campus, y la instalación de los componentes como: el sistema de recolección, conducción, separador de primeras lluvias, caja de llegada y tratamiento.
- Se necesitaría inversión para la infraestructura de almacenamiento y para los sistemas de captación de agua de lluvia en cada uno de los edificios.



De acuerdo al análisis económico realizado por Arreola (2018) sobre la construcción de una cisterna enterrada de mampostería confinada de 14 m³, se obtuvo un monto total de \$28,641. (aproximadamente, \$2045.81 por m³ de agua). Considerando los índices inflacionarios de precios, proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se tuvo un incremento anual del 2.83% en el 2019 y un 3.33% en el 2020. Esto modifica el precio del tanque de almacenamiento a \$30,432.27 (aproximadamente \$2,173.7 por m³ de agua).

Así, la construcción de cisternas que almacenen el agua captada bajo el escenario 4, tendrían un costo de \$ 9, 192, 577.3, que es un número muy elevado, por lo que puede ser un factor limitante para la toma de decisiones en la implementación de SCALL en CU por parte de las autoridades del campus.

8.2. Propuestas y recomendaciones de gestión y almacenamiento de agua

De acuerdo a los escenarios planteados, es posible utilizar el almacenamiento actual de las cisternas existentes para satisfacer hasta un 80% (Escenario 2) de la demanda en el campus. Esta agua almacenada puede ser usada para el uso de los sanitarios, limpieza y aseo personal.

Además, de acuerdo a la identificación de las cisternas en campo, éstas son distribuidas de manera uniforme (Figura 51), donde una sola cisterna puede abastecer a uno o más edificios (Tabla 17).

Por otro lado, estas cisternas, al ser enterradas, no alteran el paisaje, y su cubierta forma parte de las áreas verdes del campus (Figura 54).



*Figura 54. Cisterna localizada en áreas verdes de CU.
Fuente: Elaboración propia.*

Sin embargo, cabe destacar que es necesario dar mantenimiento a estas cisternas, principalmente a las que se encuentran en malas y muy malas condiciones (Figura 53).

Por ello, se recomienda lo siguiente:

- ✓ Eliminar raíces de árboles y remover hojas: para evitar la acumulación de materia orgánica, así como la alteración de parámetros de calidad del agua como color verdadero y turbiedad.
- ✓ Pintar o cambiar las tapas oxidadas: es necesario dar mantenimiento a las tapas que se encuentren oxidadas, ya sea pintarlas o cambiarlas por una tapa de acero inoxidable, para evitar los sedimentos de óxido que pueden caer al agua y causar daños en la salud de los usuarios.
- ✓ Limpieza general de las cisternas: hacer un lavado y desinfección por lo menos una vez al año.
- ✓ Detectar y eliminar fugas: para evitar pérdidas de agua y mejorar la eficiencia del sistema.



- ✓ Subir el nivel de la tapa principal para evitar el arrastre de sedimentos durante las lluvias.
- ✓ Colocar reductores de turbulencia y pichanchas flotantes: el reductor de turbulencia es un dispositivo que permite la entrada del agua a la cisterna de manera calmada. Esto evita que se revuelvan los sedimentos que se depositan en el fondo. Por otra parte, las pichanchas flotantes permiten la succión del agua desde la superficie del agua, de manera que no lleve sedimentos del fondo (Figura 55).

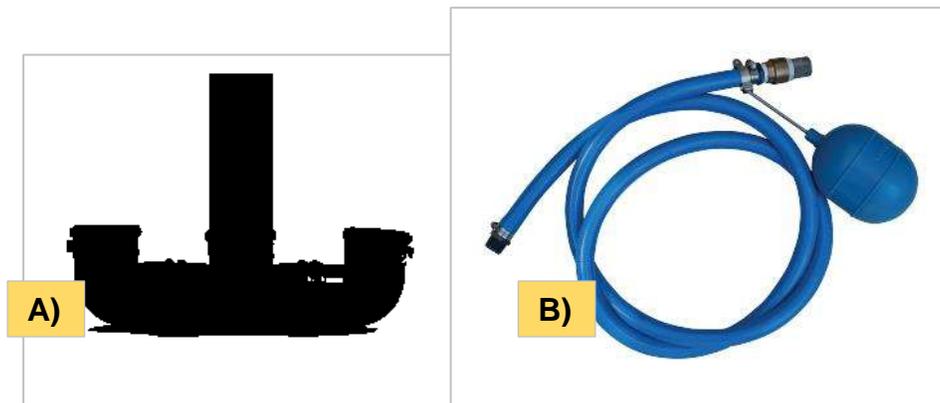


Figura 55. Figura 56. A) Reductor de turbulencia. B) Pichancha flotante.
Fuente: Isla Urbana.

Como parte del mantenimiento del sistema, en cuanto a las azoteas se recomienda:

- ✓ Limpieza de hojas de los árboles.
- ✓ Remover objetos que puedan alterar la calidad del agua (objetos metálicos, basura)
- ✓ Utilizar canaletas con rejillas, para evitar que entren hojas, ramas u objetos grandes al sistema.
- ✓ Renovar impermeabilizantes que se encuentren muy deteriorados.



Por último, estos sistemas pueden ser complementados con un tren de filtración, por donde pasa el agua que es bombeada desde la cisterna hacia los tinacos. Este tren se conforma por un filtro para la retención de sólidos suspendidos (sólidos que no son removidos con la sedimentación), así como filtros de carbón activado para remover colores, olores y sabores. Para la desinfección, se recomienda el uso de dosificadores de cloro (hipoclorito de calcio) en las cisternas para mantener el agua libre de microorganismos.

En cuanto a la distribución del agua, ya se cuenta con la instalación de sistema de bombeo para la distribución del agua en los edificios. Sin embargo, si se quiere disminuir el consumo de energía, se recomienda la sustitución de la bomba alterna por una bomba específica para energía solar, que permite reducir el uso de combustibles fósiles que emiten gran cantidad de CO² (Figura 56).

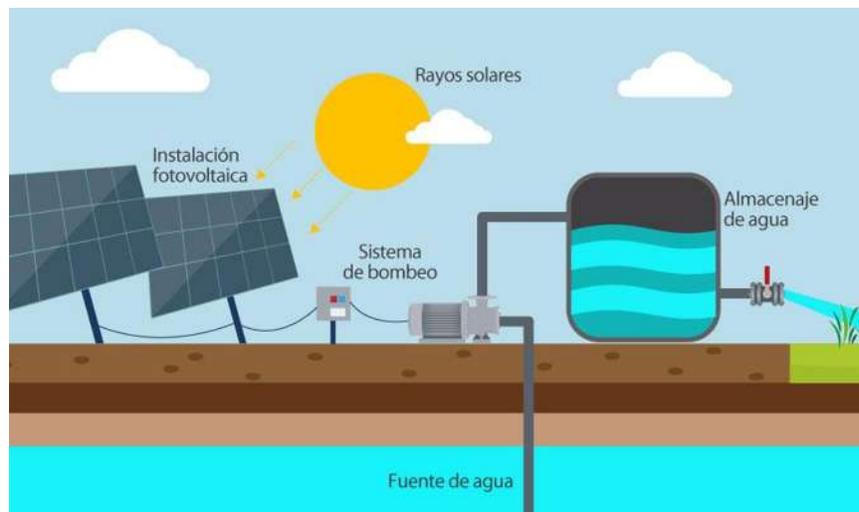


Figura 56. Esquema de bombeo solar.
Fuente: Biblus.

El agua obtenida con la captación de agua de lluvia no será apta para beber, ya que necesita pasar por un proceso de purificación. Sin embargo, para fines de los usos en los edificios, no es necesario este proceso.



9. Conclusiones

El potencial de captación de agua de lluvia es una estimación de cuánta agua de lluvia puede ser captada y almacenada en el sitio de estudio. En este caso, Ciudad Universitaria de la UMSNH cuenta con 85 edificios en los cuales pueden aprovechar el agua de lluvia para satisfacer sus necesidades.

Al obtener la precipitación, el área de captación, el coeficiente de escurrimiento y la demanda de agua, se realizaron cuatro simulaciones dinámicas del movimiento del agua de acuerdo al agua de lluvia que se capta, que se va consumiendo con los meses y el agua que se puede quedar almacenada.

En el escenario 1, si se utilizara toda el área de las azoteas disponibles en el campus, se podría abastecer completamente la demanda durante todo el año, sin embargo, no se toma en cuenta un límite en el almacenamiento. En el escenario 2, si se utilizara el almacenamiento existente del campus y el 100% de las áreas disponibles, se podría satisfacer la demanda en un 80%, con un aprovechamiento de 17,544 m³ de agua de lluvia al año sin tener que construir tanques para el almacenamiento de agua.

En el escenario 3 si se aprovecha un 50% del área y se utiliza el almacenamiento actual, se podría abastecer la demanda durante cinco meses en el año (y se satisface la demanda total en un 68%). Con esto, se emplearían menos áreas de captación y se reducirían los costos de implementación de los sistemas para cada edificio, con un aprovechamiento anual de 14,982 m³ de agua de lluvia.

Por otro lado, en el escenario 4, se planteó la construcción de tanques de almacenamiento, con un volumen total de 4,229 m³, así como su complementación con el almacenamiento existente para lograr satisfacer la demanda en un 100% durante todo el año. Sin embargo, esta construcción resultaría muy costosa y poco factible para su implementación en el campus.



En ese sentido, es pertinente el uso de sólo una parte del área de Ciudad Universitaria (distribuida en todo el campus), como se plantea en el escenario 3, para poder aprovechar el agua sin tener que construir sistemas de captación y cisternas de almacenamiento en todos los edificios. Además, tomando en cuenta esta capacidad de almacenamiento actual en el campus, se pueden reducir considerablemente los costos de construcción y mejorar la factibilidad para la implementación de sistemas de captación de agua de lluvia en el campus.

En cuanto a la información cualitativa de las azoteas de los edificios, se identificaron cuántas de éstas necesitan mantenimiento para no alterar la calidad de agua. Por lo cual, si se emplea el 50% de las áreas, se podrán elegir con base en las identificadas con mejores condiciones para su implementación.

Para la distribución del agua en el campus, no fue necesario ubicar tanques en zonas más altas para su distribución por gravedad, ya que ahora se cuenta con cisternas distribuidas en todo el campus que ya cuentan con un sistema de bombeo.

En este trabajo de investigación, se cumplieron los objetivos generales y específicos (apartados 6.1 y 6.2) al evaluar cuantitativa y cualitativamente el potencial de aprovechamiento de agua de lluvia; así como la hipótesis planteada en la investigación (apartado 5), ya que el potencial de captación de agua de lluvia de los edificios es suficiente para satisfacer las necesidades de consumo de agua para los edificios en el campus.

Se proporcionaron los elementos técnicos suficientes para establecer cuatro escenarios para el aprovechamiento de agua de lluvia. En ese sentido, estas propuestas están sujetas a la decisión de las autoridades del campus, para su futura implementación tomando en cuenta las ventajas y desventajas de cada uno.



10. Referencias

- 2030 WRG. (2012). *Catalyst for action. Partnership for sustainable water resources management. Annual Report*. Washington D.C.
- Abbott, B., Bishop, K., Zarnetske, J., Minaudo, C., Chapin, F., Krause, S., & Hannah, D. (2019). Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. *Nature Geoscience*, 533-540.
- Abdullah, S., Taher, T., & Naoman, A. (2017). *Manual for Rooftop Rainwater Harvesting Systems in the Republic of Yemen*. Yemen.
- Abugna, D., Bergen, M., Lemma, B., & Sahilu, G. (2018). Assessing the Potential for Rooftop Rainwater Harvesting from Large Public Institutions. *Environmental Research and Public Health*, 15(336). doi:10.3390/ijerph15020336
- Aerial Insights. (11 de enero de 2019). *Todo lo que tienes que saber sobre los puntos de control*. Obtenido de <https://www.aerial-insights.co/blog/puntos-de-control/>
- Alfaro, F. (5 de junio de 2020). *Padecen 99 colonias desabasto de agua en Morelia*. Obtenido de <https://www.quadratin.com.mx/municipios/morelia/padecen-99-colonias-desabasto-de-agua-en-morelia/>
- Allen, L. (2015). *The Water-Wise Home. How to Conserve, Capture, and reuse water in Your Home and Landscape*. North Adams MA: Storey.
- Anaya, M. (2007). *Manual sobre Sistemas de Captación y Aprovechamiento de Agua de Lluvia para Uso Doméstico y Consumo Humano*. México: CIDECALLI-CP.
- Anaya, M., Pérez, A., Martínez, I., & López, H. (2018). *Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL), Manual técnico*. Colegio de Postgraduados. México: Red Temática en Sistemas de Captación de Agua de Lluvia.



- Anaya, M., Salazar, J., Tunarosa, V., & Trejo, J. (1998). *Sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico en América Latina y el Caribe*. México: IICA.
- Arreguín, F., Alcocer, V., Marengo, H., Cervantes, C., Albornoz, P., & Salinas, M. (2010). Los retos del agua. En A. M. Ciencias/CONAGUA, *El agua en México: Cauces y Encauces* (págs. 51-77). México: Jiménez, B.; Torregrosa, L.; Aboites, L.
- Arreola, G. (diciembre de 2015). Muestreo y análisis de agua de lluvia para su aprovechamiento en instalaciones de CU de la UMSNH. Tesis. Morelia, Michoacán.
- Arreola, G. (septiembre de 2018). Escenarios factibles para el aprovechamiento de agua de lluvia en la Facultad de Ingeniería Civil (edificio "C", C.U.) de la UMSNH. Morelia.
- Balagué, J. (7 de febrero de 2019). *¿Qué son los puntos de control topográficos en la fotogrametría con drones?* Obtenido de https://terradron.cat/que_son_puntos_control_topograficos_fotogrametria_drones/
- Bourguett, V., & Ochoa, L. (2003). Reducción integral de pérdidas en sistemas de distribución de agua potable. *Universidad de México*, 135-140.
- Brown, O., Gallardo, Y., Navas, F. C., & Pérez, W. (2009). Estimación del volumen potencial de agua pluvial con fines agropecuarios. *Revista de Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 55-58.
- CAPA. (2014). *El ciclo del agua*. Obtenido de http://www.capa.gob.mx/cultura/pdfs/ciclo_agua.pdf
- Chaimoon, N. (2009). Rainwater harvesting potential in Mahasarakham University (Khamriang Campus). *DAAAM World Symposium*, 781-782.



- Chavez, A., & Mautner, M. (16 de marzo de 2016). *Potencial de aprovechamiento de captación de agua de lluvia (SCALL) en México*. Obtenido de http://www.agua.unam.mx/saberdelagua/assets/pdf/Chavez_MautnerIINGEN.pdf
- Chubaka, C., Whiley, H., Edwards, J., J.W., & Ross, K. (2018). A Review of Roof Harvested Rainwater in Australia. *Journal of environmental and public health*. doi:Chubaka, C. E., Whiley, H., Edwards, J. W., & Ross, K. E. (2018). A Review of Roof Harvested Rai10.1155/2018/6471324
- Clarke, R. T., & King, J. (2004). *The Water Atlas. A Unique Visual Analysis of the Wold's Most Critical Resource*. The New Press.
- CLICOM. (2015). *Climatología Anual de Precipitación (1986-2015)*. 16080-MORELIA (OBS), MICH. Obtenido de <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- Cobos, C. (marzo de 2017). *Recomendaciones para la implementación de prácticas y políticas relacionadas con los sistemas de cosecha de aguas lluvias frente al cambio climático*. Tegucigalpa: GWP Centroamérica.
- CONAGUA. (2011). Agua en el mundo. En Conagua, *Estadísticas del agua en México* (págs. 113-126). México.
- CONAGUA. (2014). *Estadísticas del agua en México*. México, D.F.
- CONAGUA. (2016). *LINEAMIENTOS TÉCNICOS: SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA E LLUVIA CON FINES DE ABASTO DE AGUA POTABLE A NIVEL VIVIENDA*. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/152776/LINEAMIENTOS_CAPTACI_N_PLUVIAL.pdf
- CONAGUA. (2016). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado*. México.



- CONAGUA. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Redes de Agua Potable*. México, D.F.
- CONAGUA. (31 de enero de 2017). *¿Qué es el agua renovable? La mayor parte del agua de lluvia en México se evapora y sólo una mínima cantidad recarga los mantos acuíferos*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/que-es-el-agua-renovable?idiom=es>
- CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México*. Ciudad de México.
- Esparza, M. (2014). La sequía y escasez de agua en México. Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia. Revista de historia y ciencias sociales*, 193-219.
- FAO. (abril de 2013). *CAPTACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/019/i3247s/i3247s.pdf>
- FAO. (2013). *TECNOLOGÍAS PARA EL USO SOSTENIBLE DEL AGUA*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-i3442s.pdf>
- Farreny, R., Morales-Pinzon, T., Guisasola, A., Taya, C., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2011). Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments. *Water Reserch*, 3245-3254.
- García, M. (4 de noviembre de 2019). *En Michoacán ya hay comunidades que pelean por el agua: Semacdet*. Obtenido de https://primeraplana.com/noticias/mx/portal/archivos/690058?fbclid=IwAR3KTiqonmCNWANpHOPYJ53aVn88Cce9kNyIRLthKBcTfoOrdDSy_s8c9d4
- Garduño, V., Giordano, N., Ávila, J., Hernández, V., Sámano, A., & Díaz, J. (2014). Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, Michoacán, para una correcta planificación del territorio. *Urbanización, vulnerabilidad y riesgo*, 197-222.



- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M., & P H van Beek, L. (2012). Water Balance of Global Aquifers Revealed by Grondwater footprint. *Nature*(488), 197-200. doi:10.1038/nature11295.
- Haq, S. (2017). *Harvesting Rainwater from Buildings*. Bangladesh: Springer.
- Hernández, F. (2017). *Captación de agua de lluvia como alternativa para afrontar la escasez del recurso. Manejo integrado de la Subcuenca Alta del Río Grande en la Sierra Norte, Oaxaca*. Obtenido de http://licenciatura.iconos.edu.mx/k_angi/nueva/tienda/biblioteca/Manual%20Captacion%20de%20agua%20de%20lluvia.pdf
- Hernández, S. (26 de julio de 2019). *Aprovechable agua de lluvia, que hasta 60% se va al drenaje*. Obtenido de https://www.elsoldemorelia.com.mx/local/aprovechable-agua-de-lluvia-que-hasta-60-se-va-al-drenaje-3954116.html?fbclid=IwAR0Z9gJZafNz1RbTt3XREVdAuvOP315BY03uRbcqnfHzY-zG5k6x_6SWFxA
- Hoekstra, A., & Mekonnen, M. (2012). The water footprint of humanity. *PNAS*, 3232-3237.
- IMTA. (septiembre de 2015). *Captación y aprovechamiento de agua pluvial a nivel domiciliario y comunitario*. Obtenido de http://www.agua.unam.mx/reunamos/assets/pdfs/CordovaMiguel_IMTA.pdf
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Morelia, Michoacán de Ocampo*.
- IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014 Informe de Síntesis*. ISBN 978-92-9169-343.
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. En *Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza: R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds).



- Isla Urbana. (2018). *Ficha Técnica Tlaloque 200, separador de primeras lluvias*.
Obtenido de <http://islaurbana.mx/wp-content/uploads/2018/11/ficha-te%CC%81cnica-Tlaloque-200.pdf>
- Kamnik, R., Grajfoner, B., Butyrin, A., & Nekrep, M. (2017). Rainwater harvesting and green area retention potential using commercial unmanned aerial vehicles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
doi:10.1088/1755-1315/90/1/012113
- Kirmeyer, J., Kirby, L., Murphy, M., Noran, F. M., Lund, W., Anderson, L., & Medhurst, R. (1999). *Maintaining water quality in finished water storage facilities*. Denver, United States: AWWA Research Fundation and AWWA.
- Mantoya-Pachongo, C. (2012). *Efecto del almacenamiento sobre la calidad del agua potable: evaluación experimental y simulación numérica del tanque Ciudad Jardín*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- MARN. (25 de abril de 2016). *Guía práctica de captación de agua de lluvia*.
Obtenido de
<http://www.marn.gob.sv/download/publicaciones/GUIA%20PR%C3%81CTICA%20DE%20CAPTACION%20DE%20AGUA%20LLUVIA%20base%2021%20abr.pdf>
- Martínez-Alfaro, P., Castaño, S., & Martínez, P. (2006). *Fundamentos de hidrogeología*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Mechell, J., Kniffen, B., Lesikar, B., Kingman, D., Jaber, F., Alexander, R., & Clayton, B. (2009). *Rainwater Harvesting: System Planning*. College Station, TX: Texas AgriLife Extension Service.
- Mendez, C., Afshar, B., Kinney, K., Barret, M., & Kirisits, M. (2010). *Effect of Roof Material on Water Quality for Rainwater Harvesting Systems*. Austin: Texas Water Development Board.



- Molina, A. (27 de agosto de 2019). *Se intensifica la crisis del agua en Michoacán; Morelia, a un paso del colapso*. Obtenido de https://www.lavozdemichoacan.com.mx/morelia/se-intensifica-la-crisis-de-agua-en-michoacan-morelia-a-un-paso-del-colapso/?fbclid=IwAR3p5nK038_mYMQFRBXpQo0mcAW7ogZcViX6loyb7oWDwXZ1zyQ1mKBQXBk
- Monroy, O. (2013). Manejo sustentable del agua en México. *Revista digital universitaria*, 14, 1-15.
- OPS-COSUDE. (2004). *Guía de diseño para captación del agua de lluvia*. Obtenido de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/cd47/lluvia.pdf>
- Ordoñez, J. (2011). *Cartilla Técnica: Ciclo Hidrológico*. Obtenido de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf
- Saltiel, G. (2008). Problemática del sector de agua potable, alcantarillado y saneamiento mexicano- análisis, ejemplos y propuestas. En R. Olivares, & R. Sandoval, *El agua potable en México. Historia reciente, actores, procesos y propuestas*. (págs. 229-236). D.F.: ANEAS.
- Sánchez, J. (2012). *Precipitaciones*. Obtenido de <http://hidrologia.usal.es/temas/Precipitaciones.pdf>
- Serna, M. (2018). *Cuarto Informe del Rector 2018*. Morelia: UMSNH.
- Suárez, J., Galarza, M., & Ortiz, R. (5 de junio de 2006). *Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua*. Obtenido de <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoH.pdf>
- UNESCO. (2015). Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos del mundo 2015. *Agua para un mundo sostenible: Datos y cifras*.



- Vargas, D. (Agosto de 2009). Rainwater Harvesting: A sustainable solution to stormwater management. *Thesis in Civil Engineering*. Pennsylvania.
- Water & sanitation. (2016). *Water saving tips*. Obtenido de <http://www.dwa.gov.za/drought/docs/water-saving-tips-english.pdf>
- WWAP. (2006). *El Agua: una responsabilidad compartida, 2° informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo, resumen ejecutivo*. Obtenido de UNESCO: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000144409_spa
- Zapata, R. (1989). *Los chultunes, sistema de captación y almacenamiento pluvial*. México: INAH.
- Zhang, Y., Chen, D., Chen, L., & Ashbolt, S. (2009). Potential for rainwater use in high-rise buildings in Australian cities. *Journal of Environment Management*, 222-226.